



**Politecnico
di Torino**



CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN ARCHITETTURA PER IL PATRIMONIO

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

DALLA NUVOLA DI PUNTI AL MODELLO 3D ADATTIVO: SPERIMENTAZIONE HBIM E VPL PER LA MODELLAZIONE DEL COSTRUITO STORICO

Candidato: Dalila Vincentelli

Relatore: Proff.sa Giulia Sammartano

Co-relatore: Marco Avena

Luglio 2025

SOMMARIO

1. Introduzione.....	4
2. Dalla teoria all'applicazione	6
2.1 Metodi e Obiettivi	9
3. Metodologia.....	11
3.1 Il paradigma BIM verso l'approccio HBIM	11
3.2 Tecniche e metodi del rilievo metrico architettonico	15
3.2.1 Tecniche di rilevamento e generazione di Nuvole	17
3.2.2 Trattamento e ottimizzazione delle nuvole di punti	22
3.2.3 Segmentazione delle nuvole e approcci semantici	25
3.2.4 Le superfici matematiche: Mesh vs Nurbs	28
3.3 HBIM per la conservazione.....	29
3.3.1 Specificità del patrimonio per la parametrizzazione	31
3.3.2 Oggetti Parametrici e oggetti non parametrici	36
3.3.3 Modellazione VPL avanzata: point-cloud based.....	41
4. Il caso studio a Palazzo Reale, Torino: sala delle Guardie Svizzere.	44
4.1 Lavoro sul Caso studio.....	46
4.1.1 Acquisizione ed elaborazione dei dati fotogrammetria e LiDAR	46
4.1.2 Preparazione dei dati reality-based e modello HBIM.....	50
5. Modellazione VPL.....	66
5.1 Domanda di modellazione.....	70
5.1.1 Test 1: teorico	71
5.1.2 Test 2: Nuvola sintetica	74
5.1.3 Test 3: Elemento architettonico semplice, Il pilastro	79
5.1.4 Test 4: Elemento architettonico complesso, il soffitto cassettonato.	83
5.2 Validazione metrica.....	90
6. Discussione e Risultati.....	103
7. Discussione e Conclusioni	105
7.1 Prospettive Future:	107
8. Bibliografia	109

1. Introduzione

La digitalizzazione della conservazione del patrimonio culturale, come evidenziato dalle iniziative dell'Unione Europea (UE) nel campo del patrimonio culturale digitale, rappresenta un contesto in cui si pongono diverse sfide e opportunità. La crescente necessità di preservare il patrimonio culturale ha portato l'UE a proporre iniziative come il *Common European Data Space for Cultural Heritage*, con l'obiettivo di creare uno spazio di dati condiviso per il patrimonio culturale. La digitalizzazione diventa, pertanto, un elemento chiave in questo ambito, con programmi come il *Digital Europe Programme* che apre possibilità per investire in *data spaces* per il turismo e il patrimonio culturale. All'interno della seguente tesi si porteranno alla luce concetti fondamentali per la conservazione e il miglioramento del processo di digitalizzazione al fine di esibire metodi che possano essere un motore di ricerca a campi ancora mediamente esplorati. (Ministero, 2023)

La digitalizzazione è fondamentale per la conservazione e la manutenzione del patrimonio culturale, nonostante i processi tecnologici sono sempre più avanzati e veloci, per cui l'elemento fondamentale all'interno del mondo progettuale è il tempo e sempre più si ha il bisogno di studiare metodi che possano essere accurati, precisi ed efficienti per poter affrontare le sfide progettuali future.

Inoltre, un'altra sfida che ci si trova ad affrontare nel campo della conservazione è l'integrazione del metodo BIM (*Building Information Modeling*) con l'approccio dell'HBIM (*Heritage Building Information Modeling*) un'estensione del primo pensata per il patrimonio storico: due modi che, all'interno del seguente elaborato, cercherò di mettere in relazione o per meglio dire, sfruttare la modellazione reality-based per ottimizzare il paradigma BIM applicato al costruito. (Ministero, 2023)

Le capacità di comprensione e quindi ricostruzione digitale della semantica e della geometria dell'oggetto sono indispensabili, il saper riconoscere correttamente il ruolo intrinseco di un elemento in un più grande assieme di forme complesse, come può essere un edificio storico, incide fortemente sulla scelta di determinate tecniche di rilevamento e sulle strategie di digitalizzazione. Ne troviamo, infatti, una vasta gamma e risulta

necessario saperle utilizzare e combinare tra loro in modo che il processo possa essere ponderato fin dal principio.

All'interno del seguente elaborato di tesi saranno affrontate e sperimentate alcune tecniche di modellazione semi-automatica, auspicando che possano essere sempre più approfondite, utili e implementate nella pratica dei professionisti esperti che operano nel campo della modellazione per la conservazione del patrimonio. La tesi fornirà più di un esempio da mettere a confronto, anche con la modellazione manuale tradizionale all'interno di applicativi BIM; cercherà di capire i vantaggi dell'utilizzo di una modellazione semi-automatica, in quanto una ottimizzazione dei processi di modellazione potrebbe giovare ai tempi e all'accuratezza metrica ovvero l'aderenza alla realtà, caratteristica fondamentale della modellazione dell'esistente e motore di ricerca per nuovi metodi di approccio alla modellazione degli elementi/edifici del patrimonio culturale.

Il lavoro di tesi affronta metodologie e dati che lo collocano all'interno di un progetto più ampio di nome TAKE CARE - Progetto di ricerca applicata "Digitalizzazione del processo di conservazione" che ha come casi studio il Palazzo Reale di Torino, l'Armeria E la biblioteca Reale, la Cappella della Sindone e Giardini Reali. Questo progetto è stato finanziato dal bando: PRIMA- Prevenzione Ricerca Indagine Manutenzione Ascolto per il patrimonio culturale di Compagna di San Paolo, e svolto in collaborazione con Musei Reali di Torino (Arch. Marina Feroggio). Partner del progetto sono: Politecnico di Milano: resp. Stefano Della Torre; Architetto Rossella Moioli; Politecnico di Torino, DAD- Laboratorio di Geomatica per i Beni culturali: resp. Nannina Spanò.

2. Dalla teoria all'applicazione

Nella sfera della conservazione del patrimonio ci si trova ad affrontare più di una sfida, innanzitutto per la documentazione digitale e relativa modellazione del costruito: l'aderenza alla realtà, i lunghi tempi di modellazione manuale per oggetti storici, quindi, forme complesse e l'utilizzo di programmi che sono solitamente pensati e strutturati per la nuova costruzione, non considerando le sostanziali differenze con l'ambito della conservazione del patrimonio.

Una di queste sfide ricade direttamente sulla gestione del ciclo di vita dell'edificio storico, in particolare sulla manutenzione.

Un aspetto che ha un'elevata rilevanza nella scelta di approcci alla modellazione parametrica per la generazione di modelli 3D intelligenti, all'interno del ciclo di vita dell'edificio storico, e di conseguenza nel processo di conservazione del patrimonio, è la manutenzione, che incide nettamente sulle scelte di gestione, conservazione restauro future. In questo campo, recentemente, attraverso l'utilizzo dell'approccio HBIM sarebbe possibile lo sviluppo di una rete di informazioni informatizzate connesse allo stesso modello 3D cosicché possano essere utilizzate da diversi attori coinvolti. (Alshwabkeh, et al., 2024; Della Torre, et al., 2023; Siewczyński, et al., 2025) Per poter auspicare questo è cruciale il continuo monitoraggio del manufatto storico attraverso una precisa documentazione delle fasi storiche e delle fasi di restauro precedenti, quindi un'elevata attenzione anche per la dimensione spazio-temporale. All'interno delle problematiche che possiamo trovare nel flusso di lavoro HBIM per la conservazione e digitalizzazione del Patrimonio storico troviamo anche, molto spesso, l'utilizzo di programmi commerciali, che al contrario di quelli open source, sono soggetti a continui aggiornamenti; inoltre non sono creati da professionisti del settore, pertanto, non hanno la visione critica e conoscitiva di un esperto in materia di rilevamento e modellazione del patrimonio storico. Infatti, per anni si è cercato di creare software open source con elevata affidabilità e che possano garantire accessibilità, trasparenza e possibilità di personalizzazione. (Diara, 2022; Diara, 2025)

Da queste criticità nasce la necessità di strumenti alternativi: soluzioni aperte, accessibili e modellabili secondo le reali esigenze del settore.

L'integrazione del processo BIM con la modellazione nell'ambito della conservazione del patrimonio, HBIM, propone una metodologia che possa ottenere il massimo rendimento da programmi come Autodesk Revit e che li manipoli per ottenere un risultato più fluido e congeniale alle regole della modellazione dell'esistente. (Alshawabkeh, et al., 2024; Ávila, et al., 2024) Fondamentale è l'approccio con cui si affronta la modellazione del patrimonio storico: ci si trova di fronte un elemento noto, pertanto, il primo passo sarà riconoscere che tipo di forma geometrica sia e quale ruolo sopperisca all'interno di un più grande assieme di forme complesse.

Questo primo passaggio, unito alla conoscenza del programma utilizzato, determinerà le scelte sui passaggi di modellazione che permetteranno di ottenere un modello il più possibile aderente alla realtà, che rimane il principale limite di questi strumenti. Si cercherà infatti di aumentare questo livello di aderenza attraverso un utilizzo ragionato della parametrizzazione¹, che permette una modellazione più precisa e regolata rispetto al disegno libero, e, in alcuni casi, attraverso strumenti più avanzati come la modellazione semi-automatica² tramite linguaggi visuali. L'obiettivo è quello di leggere i dati di partenza in modo costante, limitando le disomogeneità dovute a interpretazioni soggettive o errori manuali. (Calvano, et al., 2022)

Necessaria, anche, una classificazione dei dati e delle informazioni di base per la gestione della conoscenza, attraverso una mappatura che possa essere chiara e utilizzata sin da subito da tutti gli attori all'interno del progetto. Sono fondamentali i protocolli di comunicazione tra le varie fasi progettuali (generazione, segmentazione, classificazione e ricostruzione), comprese per esempio dal processo Scan-to-BIM, standard per la generazione di modelli 3D a partire da nuvole di punti, e l'interoperabilità all'interno di ognuna di esse: aspetti che molte volte vengono meno, creando carenze informative

¹ Quando si parla di modellazione manuale si può intendere un ampio spettro di pratiche, che vanno dalla modellazione **simil free-form** (es. software CAD o modellatori come Rhino), fino a quella **parametrica** classica (come Revit), dove la modellazione è guidata da parametri e regole predefinite.

² La modellazione semi-automatica rappresenta un ulteriore livello di automazione, in cui si impiegano strumenti come i **linguaggi di programmazione visuale** (VPL), che permettono di generare geometrie complesse o ripetitive partendo da regole astratte e dati rilevati (es. nuvole di punti), mantenendo però il controllo umano su scelte e fasi cruciali del processo. Non si tratta quindi di un processo completamente automatico, ma di un metodo ibrido.

all'interno dell'iter-progettuale. (Brusaporci, et al., 2023; Moyano , et al., 2023; Roman, et al., 2023)

Un elemento che influisce sulla modellazione è la tipologia e qualità dei dati, e dipende dalla qualità del dato, come ad esempio caratteristiche di superficie (rumore) o continuità nei rilievi 3D ed eventuali lacune, come porzioni mancanti o superfici acquisite in modo diverso a causa del materiale o della riflettività dello stesso oppure dalla densità della nuvola di punti. (Grilli, et al., 2017) In questi casi si appiccheranno delle ottimizzazioni ai dati di base forniti della nuvola di punti che favoriranno in modo significativo il peso dei *file* e ne minimizzeranno i tempi di lettura e di calcolo.

2.1 Metodi e Obiettivi

All'interno del seguente elaborato verranno introdotte diverse conoscenze e metodologie pregresse, apprese nel percorso di studi ma verranno anche utilizzate metodologie apprese durante il percorso di ricerca. Le nuove metodologie apprese saranno fruite in modo attento avendo prima eseguito uno studio delle basi teoriche che verranno descritte nei primi capitoli della tesi.

La conoscenza pregressa a cui ci si riferisce sta all'interno della metodologia di scelta per il caso studio. L'apparato architettonico storico al fine della ricerca che andremo ad affrontare deve avere determinate caratteristiche tali da poter avvalorare la tesi e per poter essere una sfida attraverso la quale si spinga ad un adeguato sviluppo di ricerca. Le caratteristiche fondamentali che influiscono sulla scelta del caso studio sono una forte eterogeneità e complessità nelle forme geometriche e negli elementi dovuta in particolare ad essere un edificio storico.

Verranno in seguito presentate metodologie di rilevamento 3D che sono state eseguite precedentemente, insieme a quelle di assemblaggio e ottimizzazione. Tutte queste tecniche verranno ampiamente descritte e approfondite nei capitoli che verranno.

L'utilizzo delle metodologie *Up-Sampling*, la riduzione ingente di una quantità di punti di una nuvola di punti ai fini di semplificare la lavorazione, i tempi di calcolo e le dimensioni dei file (Fan, et al., 2019) (Yao, et al., 2021) (Yu, et al., 2024), è fondamentale per la sperimentazione dei test che verranno proposti all'interno dell'elaborato e che saranno supportati dalla teoria approfondita che li precede.

La metodologia che vedremo più fortemente utilizzata e sperimentata all'interno tesi è l'utilizzo della semi-automazione attraverso la VPL (Visual Programming Language) che metteremo a confronto con una tecnica che viene usata da molto più tempo che è la modellazione manuale tradizionale, così potremmo avere un quadro dettagliato delle differenze tra i due approcci e sviluppare un approccio critico che determini i vantaggi e gli svantaggi delle due metodologie.

Il seguente elaborato è sostanzialmente diviso in due parti, la prima tratterà principalmente della ricerca teorica, che servirà per poter prendere coscienza e poter in seguito fare delle scelte ponderate, la seconda affronterà l'applicazione di un metodo per la modellazione semi-automatica, attraverso la VPL (*Visual Programming Language*) in uno specifico caso

studio, che cercherà di dimostrare i vantaggi nell'utilizzo della stessa rispetto alla modellazione manuale tradizionale.

Attraverso la ricerca teorica approfondita si ha l'obiettivo di apprendere le fondamentali conoscenze necessarie per poter sviluppare il senso critico che determinerà la nostra conoscenza e capacità di valutazione. Importanti caratteristiche che saranno in grado di individuare il percorso adatto per eseguire i test e le sperimentazioni con cognizione di causa.

Uno degli obiettivi focali della tesi è avvalorare l'idea che le tecniche di semi-automazione siano la scelta migliore da fare per affrontare la modellazione di un apparato storico rispetto al metodo tradizionale basandosi su risultati concreti, ci si auspica, come quelli della diminuzione dei tempi di modellazione, di riconoscimento degli elementi architettonici utilizzando la segmentazione semantica e la riduzione dell'errore umano mantenendo però la consapevolezza come pilastro cardine del processo di elaborazione di tutte le fasi iter-progettuali che si potrebbero affrontare.

La conoscenza intrinseca delle forme geometriche complesse caratterizzanti gli elementi architettonici storici serve anche per riuscire a rendere flessibili, attraverso diversi ragionamenti, programmi, come Autodesk Revit, che hanno delle limitazioni per la modellazione di elementi molto complessi. Lo scopo è manipolare i suddetti programmi attraverso, strategie ben studiate, e sfruttarli a vantaggio della richiesta finale del progetto in questione. In questa tesi, infatti si cercherà di utilizzare Dynamo (plug-in di Autodesk Revit) per poter smussare le rigidità che Autodesk Revit presenta diventando così dei limiti per la modellazione.

Un ulteriore scopo di questa tesi è ampliare la classificazione degli elementi in categorie riconoscibili all'interno di librerie digitali che diventa fondamentale per la comprensione dell'essenza dell'architettura e dei collegamenti tra gli elementi. L'utilizzo dell'automazione combinata con rilievi 3D mira a fornire una descrizione semantica degli elementi architettonici, consentendo una visione chiara e distintiva, anche per parti storiche o restaurate. (Moyano , et al., 2023) (Nieto-Julián, et al., 2025) In questo scenario, l'obiettivo finale di questa tesi è affrontare le complessità legate alla conservazione a lungo termine degli oggetti storici, prendendo in considerazione la manutenzione, la classificazione e la rappresentazione accurata attraverso la modellazione 3D.

3. Metodologia

La metodologia per poter affrontare un intero processo HBIM deve la sua complessità alla necessità di possedere competenze eterogenee in molti campi e consapevolezza di quello che sarà l'obiettivo del progetto.

La metodologia si potrebbe riassumere in macro-fasi: acquisizione dati attraverso il rilievo metrico, trattamento e registrazione dati grezzi, ottimizzazione (Up-sampling oppure Sub-sampling), segmentazione e classificazione semantica, modellazione parametrica *Reality based*, organizzazione dell'informazione e degli attributi, infine interoperabilità e output. (Murphy, et al., 2009)

Per affrontare con successo ciascuna di queste fasi, sono necessarie competenze trasversali che toccano ambiti disciplinari molto diversi tra di loro. Quindi è fondamentale il contributo di figure professionali differenti, ognuna con competenze specifiche, per arrivare a un risultato che corrisponda agli obiettivi informativi per cui il modello è stato creato, a supporto di attività di conservazione e restauro. Proprio per questo, l'interoperabilità tra dati e funzioni (implementate nei software di gestione) diventa un aspetto cruciale, (Moyano , et al., 2023; Roman, et al., 2023) considerando l'elevato numero di attori coinvolti che, oltre a intervenire direttamente sul progetto, devono poter accedere anche alle fasi precedenti per prendere decisioni consapevoli.

3.1 Il paradigma BIM verso l'approccio HBIM

All'interno del panorama introdotto nel precedente capitolo si procede ad elaborare un quadro generale dell'ambito del BIM, dell'HBIM e delle loro regole. La prima regolamentazione per quanto riguarda la Visualizzazione 3D del Patrimonio Culturale può essere individuata nella Carta di Londra (London Charter, et al. 2025), il cui obiettivo principale è delineare dei principi di rigore intellettuale.

La Carta di Londra considera cruciale la trasparenza: la comunità scientifica deve poter ritenere il metodo regolamentativo affidabile e di qualità, valutando i metodi e le applicazioni dello stesso senza dover fare affidamento solo sulle affermazioni dell'autore. Si sottolinea l'importanza della credibilità delle ricostruzioni 3D, non solo per il mondo accademico, ma anche per la validazione di una ricerca scientifica, che deve essere valutata

secondo criteri decisi a priori, evitando interpretazioni modellative fantasiose e non verificabili.

L'importanza della Carta di Londra si riflette in una serie di principi chiave per l'uso della visualizzazione 3D nella conservazione del patrimonio culturale. La prima considerazione riguarda la necessità di una coesione tra obiettivi e metodi; la visualizzazione 3D deve essere adottata solo quando rappresenta l'approccio più adeguato ed efficace. Questo principio consente di garantire che le scelte metodologiche siano orientate a risultati concreti e significativi.

Un altro aspetto cruciale è la valutazione delle fonti di ricerca: è imperativo identificare e analizzare tutte le informazioni, sia digitali che tradizionali, che influiscono sulla creazione dei risultati della visualizzazione 3D. Solo in questo modo si possono ottenere rappresentazioni accurate e di valore, evitando interpretazioni fuorvianti. Inoltre, è fondamentale rispettare i requisiti di trasparenza: fornire informazioni dettagliate e accessibili permette non solo una migliore comprensione, ma anche una valutazione critica dei metodi e dei risultati ottenuti.

La documentazione del processo di creazione della visualizzazione 3D rappresenta un altro pilastro importante. È necessario registrare ogni fase e risultato per favorire la trasparenza, il riutilizzo delle informazioni e la scoperta di nuove risorse.

Identificare standard e ontologie appropriate è altrettanto rilevante per garantire l'interoperabilità e la comparabilità dei dati.

Un ulteriore aspetto di rilievo è la sostenibilità dei processi e della documentazione digitale: è essenziale pianificare strategie che assicurino la conservazione a lungo termine dei risultati della visualizzazione 3D, tenendo conto non solo delle tecnologie ma anche delle risorse per mantenerli accessibili nel tempo.

Infine, è cruciale progettare l'accesso alle informazioni 3D in modo da favorire un coinvolgimento inclusivo, affinché diverse comunità possano beneficiare delle conoscenze prodotte.

In sintesi, i principi delineati dalla Carta di Londra costituiscono una guida fondamentale per l'applicazione della visualizzazione 3D nella conservazione del patrimonio culturale, promuovendo un approccio responsabile e sostenibile nella ricerca e nell'applicazione pratica.

Prendendo consapevolezza, nel tempo, di questi principi fondamentali, ormai radicati nel dibattito della rappresentazione 3D del patrimonio culturale, emerge l'esigenza di strumenti di regolamentazione precisi ed efficaci che diano valore e validazione alle attività progettuali. Negli anni è cresciuto esponenzialmente l'utilizzo dei modelli digitali, aumentando la necessità di un quadro regolamentativo in continuo aggiornamento, al passo con il costante incremento di velocità tecnologica.

In quest'ottica, risulta fondamentale ripercorrere l'evoluzione del quadro normativo attraverso una panoramica storica e l'analisi degli standard attualmente alla base della digitalizzazione del patrimonio.

La standardizzazione IT (Information Technology) è il processo di ricerca che ha portato alla formulazione degli standard IFC. Essa comprende il dibattito e l'elaborazione di linee guida per sviluppare modelli di ciclo di vita del progetto, inizialmente lineari e successivamente ciclici. Nella maggioranza dei casi, gli standard sono definiti dalle SDO (Standard Developing Organization), la più grande delle quali è la International Organization for Standardization (ISO), fondata nel 1947 e attualmente composta da 170 paesi.

L'ISO svolge un ruolo chiave anche nel settore dell'edilizia e delle costruzioni, regolando la gestione delle informazioni attraverso la **serie di norme ISO 19650**, suddivisa in più parti:

- ISO 19650-1: concetti generali di gestione delle informazioni con il BIM;
- ISO 19650-2: fase di consegna del progetto;
- ISO 19650-3: gestione nella fase operativa degli asset;
- ISO 19650-4: requisiti per lo scambio informativo.

Questi standard sono fondamentali per garantire interoperabilità e qualità nei processi di digitalizzazione delle costruzioni.

In Italia, tali norme sono recepite attraverso la serie UNI EN ISO, integrate dall'Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI). Esempio rilevante è la UNI 11337, specifica per il BIM, che adatta le normative ISO al contesto nazionale. (International, 2025)

All'interno di questo quadro normativo si inseriscono le Industry Foundation Classes (IFC), nate nel 1994 per rispondere alla necessità di linguaggi standard per lo scambio di dati nel settore AEC.

Nel 1995 fu fondata la IAI (Industry Alliance for Interoperability), poi rinominata International Alliance for Interoperability, con l'obiettivo di sviluppare processi aperti e interoperabili.

Lo scenario descritto ha modificato in profondità il pensiero progettuale, evidenziando quanto la condivisione dei dati sia divenuta essenziale nella gestione architettonica e nella conservazione storica.

Si può affermare che l'IFC fornisce una banca dati strutturata e standardizzata per l'archiviazione delle informazioni, senza imporsi come vincolo a uno specifico software, e proprio per questo mantiene il suo valore normativo.

La struttura del modello IFC si articola su quattro livelli:

- **Dominio:** definisce macrocategorie (es. architettura, infrastrutture);
- **Interoperabilità:** connette i modelli di dominio tra loro;
- **Nucleo (Kernel):** definisce oggetti, attributi, relazioni, ruoli;
- **Risorse:** supporta i livelli superiori con specifiche entità ausiliarie.

La prima versione, IFC 0.1, fu pubblicata nel 1997 e utilizzata per prototipi. A seguire, IFC 1.5 e 1.5.1 introdussero i primi prodotti commerciali, con focus su HVAC e strutture. La vera svolta avvenne con IFC 2.0 (1999), che ampliò il dominio includendo stime dei costi e pianificazione. Tuttavia, la scarsa adozione e la mancanza di una visione condivisa portarono nel 2000 alla decisione di rendere lo standard aperto e gratuito, avviando la sua formalizzazione come ISO PAS.

L'ISO PAS (Publicly Available Specification) è una forma di standardizzazione pensata per rispondere a esigenze urgenti del mercato: rappresenta una fase preliminare, ma ufficiale e pubblica, verso uno standard internazionale o tecnico (ISO/IS o ISO/TS). L'IFC 2x, standardizzato con ISO PAS 16739, segna un punto cruciale per l'accessibilità tra software e stakeholder.

Segue IFC 2x2 (2003), che estende le funzionalità: geometria 2D, impianti, normative edilizie, gestione strutturale.

Nel 2006 arriva IFC 2x3, che stabilizza la struttura dati e diventa largamente implementato anche in ambito storico. Si consolida in questa fase la logica della qualità informativa come fondamento dell'interoperabilità.

Infine, IFC 4 (2013) introduce una struttura semantica più ricca, nuove categorie di materiali, classificazioni e livelli informativi adattabili.

Con l'IFC 4.3, la versione attualmente più recente e stabilizzata, si compie un ulteriore salto. Pubblicata come ISO 16739-1:2023, questa versione amplia notevolmente l'ambito di applicazione del modello IFC. Non si parla più solo di architettura e edilizia, ma anche di infrastrutture lineari: strade, ferrovie, ponti, porti, canali e gallerie.

Perché è importante in un contesto come quello dell'HBIM? Perché la logica di modellazione non è più centrata solo sul singolo edificio ma sull'intero sistema costruito. Questo approccio permette di iniziare a pensare in termini più ampi, legando edifici, percorsi, vincoli territoriali e dati ambientali. IFC 4.3 quindi, pur non pensato direttamente per il patrimonio culturale, apre la strada a nuove possibili applicazioni anche in quel campo, dove spesso l'edificio non è isolato ma parte di un tessuto complesso.

Un altro aspetto interessante di questa versione è la maggiore attenzione ai modelli analitici e alla semplificazione della struttura dati per facilitarne la lettura. Anche se rimane uno standard molto tecnico, si inizia a intravedere una maggiore apertura verso chi lavora su dati complessi, come accade nel mondo del costruito storico, e non solo su edifici perfettamente "modellabili". (buildingSMART, 2023)



Figura 1 Linea del tempo IFC, elaborato sviluppato dall'autrice della ricerca.

3.2 Tecniche e metodi del rilievo metrico architettonico

All'interno del processo di documentazione digitale del patrimonio culturale, è cruciale la scelta delle tecniche di rilevamento. Queste ultime possono essere suddivise in tre grandi macrocategorie: acquisizione dati, trattamento dati, generazione e ottimizzazione delle nuvole di punti, fino alla generazione di elaborazioni 2D e 3D.

Un concetto fondamentale alla base di ogni processo di rilievo è la conoscenza approfondita delle tecnologie: solo attraverso una comprensione consapevole dei metodi e degli strumenti è possibile individuare l'approccio più adatto in funzione del soggetto architettonico da studiare o modellare. La natura, la scala, la complessità morfologica e le

condizioni ambientali del manufatto condizionano fortemente le scelte tecniche. (Grilli, et al., 2017)

L'acquisizione dei dati si configura come fase complessa e stratificata, che richiede competenze specialistiche e strumentazione adeguata. Il rilievo metrico viene spesso suddiviso in fasi sequenziali:

- Rilievo di inquadramento
- Rilievo di raffinamento
- Rilievo di dettaglio
- Generazione del modello 3D
- Produzione degli elaborati

Ciascuna fase deve concludersi con la verifica dei risultati ottenuti nella fase precedente prima di passare a quella successiva, garantendo coerenza e qualità del dato finale.

Il risultato di questi processi è la nuvola di punti, un insieme di coordinate tridimensionali (X, Y, Z) che descrivono lo spazio reale in forma digitale. La nuvola di punti può essere considerata come la base dati su cui innestare successive operazioni di segmentazione, ottimizzazione, modellazione e arricchimento informativo semantico.

Le tecniche di acquisizione oggi disponibili sono numerose e diversificate. Ciascuna presenta punti di forza e limiti specifici, e può essere utilizzata singolarmente o in combinazione, a seconda degli oggetti di rilievo, dei tempi disponibili e delle caratteristiche del soggetto.

Nel presente lavoro sono state considerate le seguenti tecniche:

- Fotogrammetria digitale automatica (terrestre e aerea)
- Scansione con misura di distanza (Laser scanner TOF, a fase, triangolazione)
- Scansione a luce strutturata
- Tecnologie MMS (Mobile Mapping System) e SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)

Ciascuna tecnica verrà sinteticamente introdotta nel paragrafo successivo, con un'analisi comparativa dei principi operativi, vantaggi e applicazioni.

3.2.1 Tecniche di rilevamento e generazione di Nuvole

Le tecniche di rilievo tridimensionale applicate al patrimonio architettonico possono essere suddivise in base al principio di acquisizione del dato: fotogrammetria, laser scanner, luce strutturata o sistemi ibridi. Ognuna di queste permette di ottenere una nuvola di punti: un insieme di coordinate spaziali (X, Y, Z) che descrive la geometria dell'oggetto rilevato.

La scelta della tecnica dipende da molti fattori: il soggetto, il grado di dettaglio richiesto, le condizioni ambientali e le tempistiche disponibili. Spesso, queste tecniche vengono combinate per ottenere risultati più precisi e completi.

Tecniche di fotogrammetria digitale automatica (terrestre e aerea)

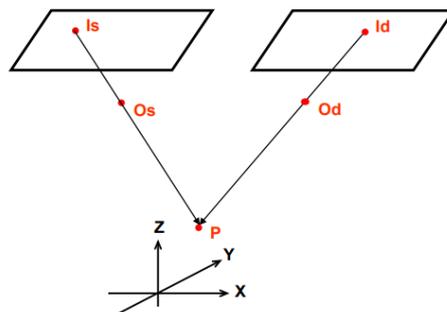


Figura 2 esempio di processo fotogrammetrico digitale: l'acquisizione di immagini da diverse angolazioni consente di ricostruire geometria, forma e dimensioni degli elementi rilevati. Fonte: dispense "Nuvole di punti HBIM, geomatica, "il rilievo metrico 3d e la generazione delle nuvole di punti", Sammartano, Diaria.

La fotogrammetria è una tecnica di rilievo 3D che sfrutta immagini fotografiche ottenute da diversi punti di ripresa per la descrizione di oggetti sul terreno tramite la definizione della posizione, della forma e delle dimensioni di questi sessi elementi; si definisce digitale quando le immagini, generate da una macchina digitale o attraverso la scansione di una tradizionale fotografia, vengono restituite sottoforma di valori e organizzati in una griglia di pixel. Il rilievo tramite fotogrammetria avviene tramite le fasi di acquisizione, orientamento e restituzione attraverso la generazione di una nuvola di punti.

È una tra le più avanzate tecniche nel campo del rilievo del patrimonio storico in quanto porta con sé diversi vantaggi. La fotogrammetria digitale risulta infatti una soluzione rapida, non distruttiva o invasiva e applicabile in diverse condizioni ambientali, anche sfavorevoli; è in grado di restituire modelli 3D mantenendo la precisione delle informazioni metriche e un'ottima restituzione cromatica se applicata sia su superfici estese che su oggetti di dimensioni ridotte. (Ávila, et al., 2024) (Grilli, et al., 2017)

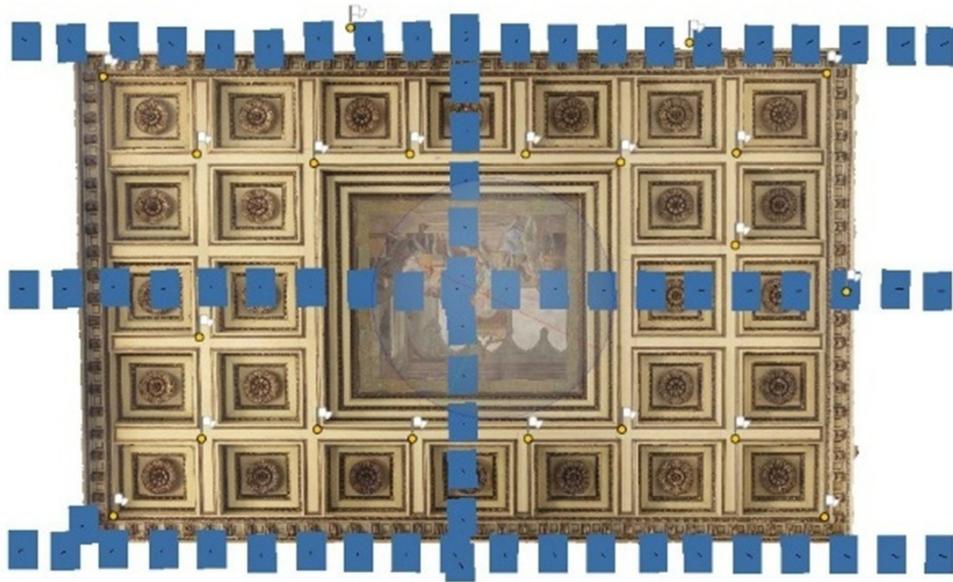


Figura 3 Schema di orientamento fotogrammetrico delle immagini. Rilievo di fotogrammetria automatica per il soffitto cassettonato ligneo della Sala delle Guardie Svizzere, Torino. I riquadri blu rappresentano le posizioni delle camere e le loro direzioni di scatto. Elaborazione del Lab-G4CH del Politecnico di Torino.

Basandosi sui principi della geometria proiettiva può individuare ed estrarre i dati tridimensionali da una fotografia e, grazie a software automatici specifici, è in grado di restituire le coordinate nello spazio dei punti notevoli dei singoli scatti, una volta ricostruita la geometria di presa, ovvero il punto di vista della scena.

Questa tecnica di rilievo si divide in: fotogrammetria digitale automatica aerea e fotogrammetria digitale automatica terrestre. Le due modalità si distinguono per punto di vista e strumenti utilizzati. Nel primo caso, infatti, l'acquisizione dei fotogrammi avviene tramite droni o velivoli dotati di camere ad altissima risoluzione a distanze di oltre 200 m che, seguendo un percorso preimpostato che garantisca la sovrapposizione di parti

dell'oggetto del rilievo, riescono a descrivere edifici di grandi dimensioni o intere porzioni di aree urbane. Nella seconda strategia l'obiettivo è posizionato su un treppiede regolabile, appoggiato sulla superficie terrestre. Come nella precedente tattica, le immagini verranno scattate in serie riprendendo soggetti come porzioni di edifici o decorazioni specifiche da diverse angolazioni e in tempi diversi ottenendo una restituzione finale integrale e fedele alla realtà. (CIPA Heritage)

Tecniche di scansione con misura di distanze (terrestri e aeree)



Figura 4 (a) L'immagine rappresenta il corpo macchina del laser scanner (b) Rappresentazione del corpo macchina del laser scanner sul cavalletto.

Fonte: <https://www.faro.com/it-IT/Resource-Library/Article/understanding-laser-scanners>

Anche tecniche di scansione con misura di distanze adoperano apparecchiature che acquisiscono le informazioni metriche dell'oggetto del rilievo senza prevedere un contatto diretto con esso, servendosi di sistemi laser o a luce strutturata nella determinazione dei punti nello spazio per la restituzione di un modello 3D fedele alla realtà.

Di questa categoria fanno parte il laser scanner a triangolazione e due strumenti che rientrano nella categoria *Light Detection And Ranging*: il laser scanner a tempo di volo (TOF) e il laser scanner a variazione di fase.

I sistemi LiDAR utilizzano una fonte che emette un laser e un sensore che attraverso la misurazione del tempo impiegato dalla luce per raggiungere l'oggetto del rilievo e tornare al trasduttore, ne restituisce la distanza. (Grilli, et al., 2017) (Rabbani, et al., 2006)

Grazie a questo metodo è possibile ottenere una grande quantità di dati, traducibili in una nuvola di punti che descrive con precisione l'elemento scansionato, in quanto quando lo strumento registra la distanza del punto rilevato, ne fissa le tre dimensioni x, y, e z.

Nel campo della documentazione del patrimonio culturale, il LiDAR viene utilizzato per la generazione di modelli 3D dettagliati di edifici storici e del loro stato di conservazione. (Bitelli, et al., 2019)

Rispetto ai rilievi tradizionali presenta numerosi punti di forza, tra cui la rapidità dell'acquisizione dei dati anche in numero elevato descrivendo la situazione dell'oggetto in relazione a un determinato momento, la categorizzazione tramite colori di queste informazioni e la possibilità di soddisfare le diverse necessità di ottenere informazioni metriche.

Ciononostante, questo metodo presenta ancora numerosi svantaggi come, ad esempio, la carenza di informazioni cromatiche e la conseguente difficoltà a interpretare i punti che, essendo senza colore, non rientrano nelle categorizzazioni. (Grilli, et al., 2017)

Per superare questi limiti l'acquisizione di dati di rilievo tramite LiDAR viene spesso integrata con la fotogrammetria digitale attraverso software che consentono di gestire al contempo i risultati di entrambe le tecniche.

Tecniche di scansione a luce strutturata

A differenza della TOF, che utilizza un diodo che emette impulsi laser, questa tecnica prevede la misurazione delle distanze dei punti dell'oggetto rilevato attraverso l'emissione di un fascio di luce continuo, con una specifica lunghezza d'onda.

Il principio di base di un laser scanner a variazione di fase si fonda sulla misura della fase del segnale emesso dal sistema laser. Come specificato, la luce laser è modulata in una certa frequenza e quando colpisce l'oggetto, parte della luce viene riflessa. L'analisi della variazione di fase tra il segnale emesso e il segnale ricevuto dal ricevitore del sistema avviene secondo una formula matematica e permette di calcolare la distanza tra il sensore e il punto dell'oggetto in modo molto preciso.

I laser scanner a variazione di fase sono noti per la loro alta precisione, in quanto la misurazione della fase è estremamente precisa, con errori minimi anche su grandi distanze

e su oggetti complessi, e velocità di acquisizione, poiché in grado di acquisire milioni di punti al secondo, garantendo scansioni rapide di grandi superfici. Questo li rende ideali per applicazioni in tempo reale o per grandi quantità di dati, rendendoli adatti per applicazioni in cui è necessaria una scansione dettagliata in tempi relativamente brevi. Sono evidenti, inoltre, alcuni altri grandi vantaggi quali: la capacità di operare con una migliore tolleranza alle condizioni di illuminazione, riducendo l'impatto di riflessi solari diretti o altre interferenze ambientali, tenendo sempre in considerazione che è un minimo fattore di visibilità è sempre richiesto; la restituzione di risultati ad alta densità ideali per dettagli minuti.

Come tutti i sistemi di rilevamento anche questo porta con sé delle limitazioni in quanto il fattore della precisione viene meno all'aumentare della distanza, in quanto la potenza del laser influisce sulla sua portata, oppure la difformità della riflessione del raggio luminoso causata da superfici riflettenti o trasparenti che rende la misurazione imprecisa.

Tecniche MMS (Mobile Mapping System)

I Mobile Mapping System (MMS) sono una tecnologia avanzata utilizzata per la raccolta di dati spaziali e geospaziali in movimento. Gli MMS combinano vari sensori (come laser scanner, fotocamere, sensori GPS e IMU (Inertial Measurement Units) per raccogliere informazioni precise su terreni, strade, edifici e altre strutture in modo efficiente e dettagliato mentre si è in movimento. Questa tecnologia è ampiamente utilizzata in settori come la mappatura topografica, l'ingegneria civile, la gestione delle infrastrutture e la cartografia urbana.

- *Tecniche SLAM (Simultaneous Location and Mapping)*

Il metodo SLAM, una sottocategoria del precedente, permette la costruzione di una mappa mentre si stima simultaneamente la posizione dello strumento. Questa tecnologia in ambienti interni e complessi, dove non è possibile utilizzare punti di riferimento noti.

3.2.2 Trattamento e ottimizzazione delle nuvole di punti

Il processo di lavoro che ci porta a strutturare un modello BIM a partire da dati reality-based può dover affrontare ostacoli derivanti anche dalle tecnologie che siamo andati ad utilizzare per il rilievo metrico dell'oggetto del progetto. Molte volte le nuvole di punti generate alla fine delle fasi del rilievo metrico presentano caratteristiche che le rendono difficili da gestire e affettate da errori o imperfezioni che possono essere causati sia da chi ha operato l'acquisizione, sia dallo strumento stesso.

In ogni caso, la nuvola che viene prodotta alla fine del rilievo necessita di un processo di ottimizzazione prima di poter essere utilizzata nel processo di modellazione. Per ottimizzare si intende, ad esempio la pulizia di dati sovrabbondanti dell'intorno, ossia punti che sono stati generati ma che non fanno parte dell'oggetto in esame, oppure errori di rumore dovuti a persone in movimento o alla presenza di superfici come vetro e metallo che, per via della loro riflessione, causano disordine o sovrapposizione di punti.

Le tecniche di trattamento e ottimizzazione si rendono necessarie in presenza di situazioni molto diverse tra loro. In alcuni casi la nuvola è troppo povera: con bassa densità, vuoti, distribuzione disomogenea o zone poco dettagliate. In altri casi la nuvola è troppo densa, sovraccarica di punti ridondanti, oppure include elementi di disturbo come vegetazione, persone.

Quando si parla, quindi, di trattamento della nuvola di punti, è utile distinguere tra due tecniche di fondamentale miglioramento per i successivi passaggi: Il sub-sampling, che opera sulla riduzione del dato e la sua più fluida gestibilità e l'up-sampling, che interviene sull'aumento della qualità e densità quando queste risultano insufficienti.

Negli approcci più recenti, tali processi sono spesso integrati direttamente nei sistemi di acquisizione, grazie a sensori avanzati dotati di capacità di elaborazione in tempo reale. Un esempio significativo è rappresentato dal sistema *FARO Flash*, utilizzato nel recente rilievo del Palazzo Reale di Torino, in grado di migliorare automaticamente la qualità e la densità del dato acquisito. Inoltre, l'impiego di algoritmi basati su intelligenza artificiale consente oggi di ottimizzare ulteriormente le nuvole di punti, tramite strategie di *de-noising*, ricostruzione delle superfici o interpolazione intelligente dei vuoti. (Sammartano, et al., 2024)

Il sub-sampling è essenziale quando si lavora con data set molto grandi. Le nuvole di punti generate con alta risoluzione possono contenere milioni, se non miliardi di punti molti dei quali ridondanti oppure, semplicemente non sono funzionali al tipo di ricerca, analisi, modellazione della domanda progettuale. (Fan, et al., 2019; Yao, et al., 2021)

Questo avviene perché spesso la fase di acquisizione prevede una raccolta di dati abbondanti e ripetuti che in seguito devono essere selezionati ed elaborati.

Tra i metodi più comuni dell'up-sampling ci sono quelli basati su griglie voxel (Shi, et al., 2024; Lyu, et al., 2024; Wang, et al., 2022), semplicemente, suddividono lo spazio in celle (voxel) regolari e per ogni cella scelgono un solo punto rappresentativo, di solito è il centroide o il punto più vicino a quest'ultimo. Metodologia che permette di alleggerire il dato e ottenere una densità uniforme ma bisogna fare attenzione a calibrarla in modo adeguato se no rischia la perdita di dettagli.

Altri algoritmi classici includono il *Farthest Point Sampling* (FPS) (Yu, et al., 2024), che seleziona iterativamente i punti più lontani tra loro mantenendo una copertura spaziale. Metodologia che ha delle grandi differenze di risultato in base alle scelte delle impostazioni iniziali.

Sono state sviluppate, anche, metodologie ibride in cui la distanza di campionamento viene adattata in funzione della curvatura locale o delle normali ai punti.

Interessante sono gli algoritmi basati su *voxel* adattivi, che sono in grado di adattare la dimensione delle celle in base alla densità locale. Alcuni metodi molto sofisticati cercano di preservare i bordi, analizzando l'angolo tra le normali locali del voxel per evitare l'eliminazione di spigoli o discontinuità.

Altri esempi includono strategie *coarse-to-fine* (Fan, et al., 2019) per nuvole del terreno, che riducono la densità adattivamente in funzione della complessità della superficie, oppure approcci strutturali consapevoli, come nel caso delle nuvole di punti di alberi, in cui l'algoritmo riconosce la topologia della ramificazione e applica tecniche locali per preservare l'integrità della struttura.

Dall'altra parte quando la nuvola risulta troppo povera, lacunosa o disomogenea si può ricorrere a tecniche di up-sampling. Un esempio potrebbe essere l'algoritmo PU-GAN (Yu, et al., 2024), che si basa sul *Generative Adversarial Network* (GAN), una rete generativa

neurale avversaria, che produce nuovi punti coerenti con la geometria esistente migliorando densità e distribuzione del dato. Questa metodologia si muove attraverso due processi: uno generativo e uno discriminativo che in corso d'opera valuta la coerenza con la nuvola originale. Il metodo è particolarmente utile in presenza di superfici riflettenti o aree poco scansionabili, infatti, questa tecnica si adatta bene a casi in cui è richiesta un'elevata fedeltà metrica e una buona continuità delle superfici.

Il contro di questa metodologia sono che lavora attraverso patch locali e di conseguenza potrebbe perdere una visione di insieme. Inoltre, non è adatta a colmare dei vuoti, se presenti nella nuvola di punti; quindi, in questo caso si dovrebbero affiancare e combinare degli algoritmi per il riempimento dei fori attraverso mesh³ triangolari. I metodi di chiusura variano dai più semplici, come la chiusura centrata sul baricentro del vuoto, fino ad algoritmi capaci di gestire grandi discontinuità.

Un'altra metodologia che si sta affermando è quella dei Neural Points (Rocha, et al., 2024) che consente di rappresentare ogni punto non come dato discreto, ma come una forma continua locale definita da un campo neurale. Questo tipo di approccio permette di eseguire un campionamento continuo delle superfici e di adattare la risoluzione a seconda della necessità, garantendo maggiore uniformità e regolarità anche in presenza di dati incompleti.

Complessivamente, il trattamento dei dati e l'ottimizzazione delle nuvole di punti non rappresentano più solo un passaggio preliminare o tecnico, ma una fase strategica dell'intero processo HBIMM. Solo attraverso un bilanciamento accurato tra riduzione e arricchimento del dato, guidato da criteri geometrici, semantici e prestazionali, è possibile ottenere modelli fedeli, leggeri e interoperabili.

³ La **Mesh** nel contesto della modellazione tridimensionale e della rappresentazione digitale è una struttura composta da vertici (punti nello spazio), spigoli (linee che connettono i vertici) e facce (superfici delimitate dagli spigoli), utilizzata per definire la forma e la geometria di un oggetto nello spazio 3D. Le facce della mesh sono solitamente triangoli o quadrilateri, e l'insieme di questi elementi consente di rappresentare superfici complesse in maniera digitale, continua e manipolabile.

Le mesh sono alla base dei modelli digitali nei software di modellazione, visualizzazione e stampa 3D, e trovano ampio utilizzo anche nel campo della documentazione e conservazione dei beni culturali.

3.2.3 Segmentazione delle nuvole e approcci semantici

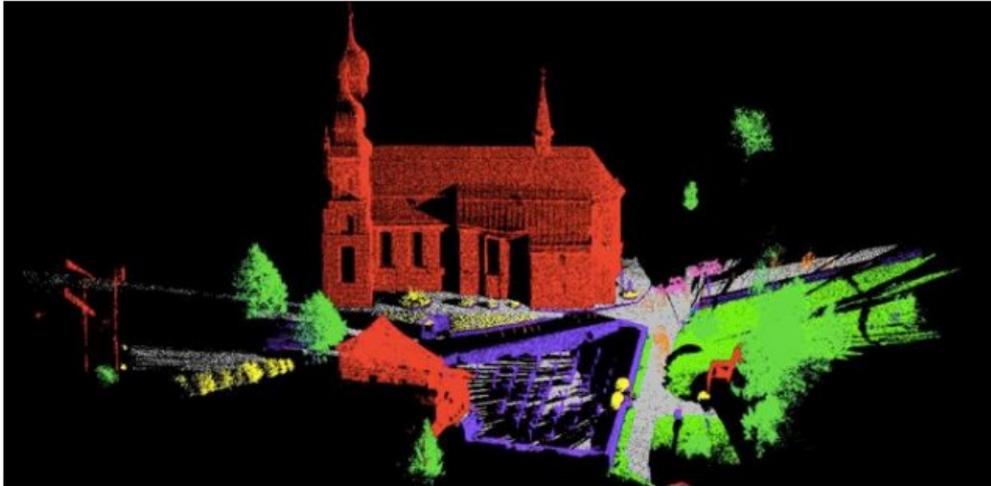


Figura 5 Esempio di segmentazione e classificazione di una nuvola di punti. Fonte: www.semanticed.net

Un aspetto fondamentale delle nuvole di punti 3D soprattutto in ambito HBIM, è rappresentato dalla segmentazione automatica. Essa costituisce un passaggio chiave per velocizzare e strutturare la modellazione, poiché consente di individuare e distinguere in modo sistematico le componenti architettoniche presenti in un rilievo complesso. (Grilli, et al., 2017) (Quattrini, et al., 2023)

All'interno dell'ambito del patrimonio digitale culturale, un processo che può accelerare la modellazione dei modelli HBIM è proprio la segmentazione semantica delle nuvole di punti 3D, con tecniche di riconoscimento automatico di elementi architettonici. (Nieto-Julián, et al., 2025) (Moyano , et al., 2023)

L'apprendimento profondo (Deep Learning) è, infatti, una tecnica che apprende attraverso algoritmi informatici automatici delle informazioni che vengono incasellate e suddivise per poter essere classificate ed etichettate. (Grilli, et al., 2017) (Quattrini, et al., 2023)

La segmentazione semantica, infatti, è un'analisi delle principali caratteristiche dell'edificio all'interno dell'ambito geometrico. Ci si trova, a lavorare a un livello di estrema precisione, poiché nel processo algoritmico vengono analizzati singoli punti o piccoli gruppi di punti, che rappresentano solo una frazione rispetto alla quantità totale. Ogni punto o insieme di punti viene elaborato e gli si attribuiscono delle caratteristiche geometriche scelte a priori e, di conseguenza, tutti i punti con caratteristiche simili verranno inseriti nella stessa categoria. L'etichettatura è fondamentale se si vogliono accelerare i tempi di modellazione manuale:

consiste nella categorizzazione in insiemi con specifiche di identità semantiche riferibili a elementi esistenti nella realtà.

In letteratura esistono svariati modi per poter segmentare una nuvola di punti. Ognuno di essi ha dei vantaggi e degli svantaggi e starà al professionista consapevole saperli utilizzare nel modo corretto per ottenere un risultato adeguato rispetto alla richiesta. Sostanzialmente vi sono cinque metodi di segmentazione basati su molteplici algoritmi: *edge based methods*, *region based methods*, *attributes based methods*, *model based methods*, *graph based methods*. (Rabbani, et al., 2006) (Barnea, et al., 2012)

- Gli *edge-based methods* si basano sul rilevamento dei cambiamenti improvvisi nella geometria, come discontinuità o variazioni di pendenza. Sono utili per identificare bordi netti, spigoli o interruzioni di superfici.

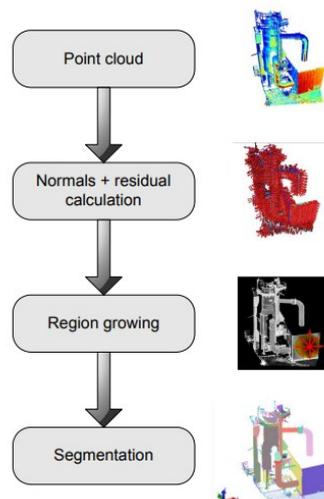


Figura 6 schema del flusso dell'algoritmo di segmentazione: Metodo *edge-based*. Fonte: (Rabbani, et al., 2006)

- I *region-based methods* raggruppano i punti in base alla continuità spaziale e caratteristiche comuni, come il piano o la curvatura. Metodologie adatte a superfici estese e omogenee.

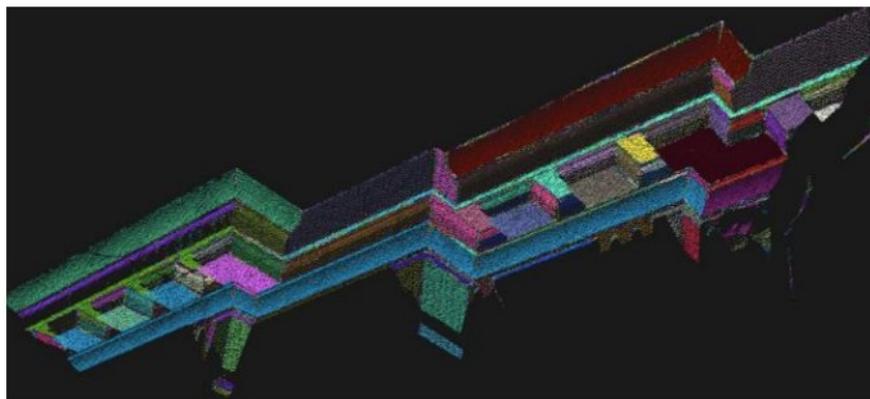


Figura 7 Nuvola di punti segmentata tramite algoritmo di region growing, implementato nella Point Cloud Library (PCL). Fonte: (Grilli, et al., 2017)

- Gli *attribute-based methods* utilizzano proprietà aggiuntive dei punti come colore, riflettanza o intensità, per separare le regioni. Metodologie particolarmente efficaci con nuvole colorate o multispettrali.
- I *model-based methods* confrontano i dati con modelli geometrici predefiniti (archi, piani, colonne) per trovare corrispondenze. Metodologia che ha bisogno, però, di un database molto ricco e in continua evoluzione per funzionare in modo adeguato. Utile in contesti di architetture particolarmente strutturate.
- I *graph-based methods* trasformano la nuvola in una struttura a grafo, in cui i punti sono nodi collegati da archi che rappresentano relazioni spaziali. L'analisi del grafo consente di segmentare strutture complesse in modo più flessibile.

Le tecniche di Deep Learning sono ancora molto acerbe all'interno dell'ambito CHD (Cultural Digital Heritage), perché i beni culturali storici sono distinti da geometrie complesse e molto spesso irregolari e variabili, anche se sono classificate all'interno di un insieme determinante lo stesso elemento architettonico. (Nieto-Julián, et al., 2025) Proprio per questo, i modelli di apprendimento automatico faticano a generalizzare le forme in modo affidabile e spesso necessitano di un dataset altamente specifico personalizzato.

3.2.4 Le superfici matematiche: Mesh vs Nurbs

Nella modellazione tridimensionale, le superfici sono principalmente rappresentate, in due modi:

- **Mesh poligonali** rappresentazione esplicita;
- **Nurbs** rappresentazione parametrica.

La **Mesh poligonale** è un insieme di vertici, spigoli e facce (solitamente triangolari) che definisce la geometria di un oggetto. Rappresenta la superficie come una serie di piani piatti, conferendo continuità.

Le mesh poligonali hanno diversi vantaggi, tra cui una grande flessibilità di rappresentare geometrie complesse e anche irregolari. Inoltre, molto spesso, sono la rappresentazione geometrica preferita per i dati di acquisizione tramite *Laser scanner* 3D e Fotogrammetria. (Lorensen, 2020)

Le mesh si portano dietro anche dei limiti, come l'approssimazione delle superfici curve: anche aumentando la densità di triangolazione, non si ottiene mai una vera curva continua, ma solo una sua imitazione discreta. I dati acquisiti tramite tecniche che adottano la mesh come formato predefinito o preferito, come fotogrammetria o laser scanning, presentano spesso rumore, buchi o lacune, richiedendo comunque un'accurata fase di post-processing per la pulizia, la riparazione e l'eventuale ricostruzione della geometria.

Le **NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline)** sono uno strumento matematico che rappresenta curve e superfici tramite punti di controllo, pesi e vettori. Permettono di modellare sia forme geometriche analitiche che a forma libera con elevata precisione e levigatezza. Questa tipologia di superficie può avere un altissimo controllo sulle forme, infatti, i punti di controllo offrono un riscontro continuo. Uno dei limiti e una sfida è che le NURBS sono definite da strutture a griglia rettangolari o cuboidali, e questo può limitare la modellazione di geometrie fisiche irregolari. Per superare questo aspetto si impiega la "mappa geometrica", che consente di semplificare il calcolo computazionale, altrimenti molto oneroso nel caso di oggetti complessi. La mappa geometrica costruisce una rappresentazione della forma all'interno della griglia regolare, che viene poi proiettata sulla superficie da modellare. (Dai, et al., 2024)

- **Applicazione nella modellazione di edifici storici**

La scelta tra NURBS e mesh nella modellazione degli edifici storici dipende dall'obiettivo e dalla fase del progetto, spesso risultando un approccio ibrido e complementare. Si predilige, solitamente, la scelta delle **mesh poligonali** per acquisizione rapida di una geometria *as-built* degli edifici storici. Scanner 3D e fotogrammetria producono nuvole di punti e mesh dense che catturano le irregolarità e dettagli complessi. I modelli mesh si usano spesso anche per analisi strutturali e simulazioni FEM. Le **NURBS** sono ideali per la modellazione di superfici geometriche lisce e definite come volte, colonne, modanature. Nel campo della digitalizzazione si utilizzano per le costruzioni di parti danneggiate o mancanti dove è richiesta una fedeltà geometrica elevata. (Botsch, et al., 2008)

Le mesh, sono, quindi, fondamentali per la documentazione e l'analisi dello stato attuale di un oggetto architettonico storico attraverso acquisizione diretta; le NURBS, invece, vengono usate più spesso nella modellazione di alta precisione e ricostruzione analitica. Spesso le due tipologie di superfici vengono entrambe utilizzate all'interno di un processo di modellazione creando, così, un modello digitale completo e accurato.

3.3 HBIM per la conservazione

Nel settore della conservazione sono presenti diversi aspetti che, forse, prima dell'avvento dell'HBIM non erano adeguatamente considerati appieno.

Oggi, con l'evoluzione tecnologica che avanza e una società sempre più orientata all'ottimizzazione dei processi, si cerca di perfezionare un metodo di lavoro che si può considerare quasi circolare, soprattutto se includiamo anche le fasi di manutenzione e gestione nel tempo.

Parlare di conservazione oggi significa anche parlare di prevenzione, e quindi di come mantenere un apparato storico prima che il degrado lo renda irrecuperabile. Ma non si tratta solo di degrado fisico: c'è anche un rischio di oblio culturale, legato alla memoria collettiva, che si perde quando un bene storico smette di essere conosciuto, vissuto o raccontato. (Li, et al., 2025) In questo senso, la valorizzazione passa anche dal mantenere viva la memoria nei cittadini.

L'HBIM è uno strumento che tocca moltissimi aspetti. Non è solo una banca dati per tecnici: può essere una risorsa informativa e divulgativa, utile per raccontare il patrimonio anche a chi non è del mestiere. (Grilli, et al., 2017) (Alshawabkeh, et al., 2024)

Può aiutare a ricostruire la storia costruttiva di un bene, a comprendere gli impianti nascosti, e in situazioni più complesse, diventa essenziale nei restauri straordinari, dove serve una conoscenza approfondita anche delle stratificazioni tecniche del manufatto. (Nieto-Julián, et al., 2025)

L'HBIM è fondamentale anche nei piani di manutenzione, non solo come strumento di controllo, ma come memoria operativa: sapere dove si è intervenuti, cosa è stato sostituito, cosa è originale. E in casi estremi, come disastri naturali o incendi, il modello digitale può essere l'unica traccia concreta di ciò che è andato perso. (Siewczyński, et al., 2025)

Si pone, inoltre, una questione più ampia; quella dell'accessibilità culturale: aumentare le digitalizzazioni significa permettere anche a chi vive in contesti dove la cultura è limitata o censurata di accedere, almeno virtualmente, a opere, documenti e conoscenze. È un potenziale enorme, che spesso sottovalutiamo.

Consideriamo ad esempio il caso di Notre-Dame de Paris (Triantafyllidis, et al., 2025) (Gros, et al., 2023): l'incendio ha riportato in primo piano l'importanza della documentazione digitale. Dopo il disastro, si è capito che alcuni rilievi 3D fatti prima dell'incendio erano tra i pochi strumenti utili per ricostruire l'edificio in modo fedele.

Un altro caso emblematico è quello della Basilica di San Pietro (Triantafyllidis, et al., 2025), a Roma, dove grazie alla collaborazione tra la Fabbrica di San Pietro e Microsoft è stato sviluppato un gemello digitale ad altissima definizione. La tecnologia AI è stata impiegata non per "automatizzare", ma per amplificare la lettura e la comprensione del costruito, creando un modello preciso e narrativo allo stesso tempo.

Argomento di estremo interesse per chi lavora in questo settore è davvero sorprendente vedere fin dove la tecnologia ci sta portando. Però va anche detto che le competenze necessarie sono ancora troppo marginali nei percorsi formativi universitari, almeno in Italia. Queste riflessioni ci permettono di approfondire la figura dell'architetto e la complessità degli approcci che è necessario introdurre nell'ambito del patrimonio. Capire quali strumenti e competenze siano oggi essenziali non è più solo un'opzione, ma una responsabilità. È vero che i progetti più complessi coinvolgono squadre multidisciplinari, ed è giusto così. Ma allo

stesso tempo, è ora di definire quali debbano essere le competenze minime che ogni professionista dovrebbe avere per contribuire in modo attivo a questa nuova stagione della conservazione digitale.

3.3.1 Specificità del patrimonio per la parametrizzazione

Nel contesto della conservazione del patrimonio culturale, l'applicazione del sistema HBIM deve necessariamente confrontarsi con la complessità e l'irregolarità formale degli edifici storici. A differenza dell'edilizia contemporanea, infatti il patrimonio costruito è caratterizzato da una profonda variabilità geometrica: elementi architettonici che, pur appartenendo alla stessa tipologia, presentano dimensioni differenti, deformazioni dovute al tempo e stratificazioni dovute agli interventi successivi.

Questa eterogeneità rappresenta una sfida diretta alla modellazione parametrica tradizionale, la quale si basa su famiglie e oggetti regolari, facilmente replicabili e standardizzati. Nell'ambito HBIM, invece, è spesso necessario parametrizzare l'irregolare, ovvero costruire una logica informativa intorno a geometrie che sfuggono a ogni sistematizzazione rigida. La modellazione diventa quindi descrittiva, adattandosi alla realtà documentata piuttosto che forzarla in schemi geometrici ideali.

L'Heritage Building Information Modeling (HBIM) nasce proprio per rispondere alle esigenze documentali e conservative del patrimonio storico, superando limiti del BBIM tradizionale. Il modello HBIM non si limita a una ricostruzione tridimensionale, ma integra materiali d'archivio, dati storici, metadati, cronologie di intervento, stati di conservazione, creando un vero e proprio archivio digitale vivente. Questo approccio consente non solo di descrivere l'esistente ma di supportare le scelte progettuali, la manutenzione, l'analisi conservativa e la gestione futura del bene.

Il processo di creazione di un modello HBIM è quasi sempre basato il flusso Scan-to-BIM, che parte da acquisizioni come laser scanning o fotogrammetria per trasformare dati grezzi in un modello informato. In questa trasformazione, la parametrizzazione degli elementi architettonici non è automatica: richiede, molte volte, la creazione di famiglie personalizzate o approcci ibridi in grado di gestire deformazioni, proporzioni variabili o assenze di

simmetria. Questo processo è molto più complesso rispetto alla modellazione di nuovi edifici e necessita di strumenti più flessibili e adattivi.

Nel descrivere la struttura informativa del modello è fondamentale considerare non solo il *Level of Detail (LOD)* ma anche e soprattutto il *Level of Geometry (LOG)* e il *Level of Information (LOI)*. Questi modelli devono essere adattati alle specificità degli edifici storici, dove l'informazione geometrica fine si accompagna a dati qualitativi, storici e conservativi. Ulteriori parametri come il *Level of Accuracy (LOA)* e, il *Level of Knowledge (LOK)* e il *Level of History (LOH)* permettono inoltre di definire con precisione il grado di affidabilità del modello e la profondità narrativa che esso può offrire nel contesto conservativo.

A fronte di queste esigenze, il solo impiego dei parametri tradizionali risulta spesso inadeguato per rappresentare la complessità informativa e geometrica del costruito storico. Per questo motivo, la ricerca recente ha proposto un'evoluzione concettuale che supera la logica rigida di LOD e LOI, introducendo un sistema basato su *Grado di Generazione (GoG)*, *Grado di Informazione (GoI)* e *Grado di Accuratezza (GoA)*, più adatto a descrivere i processi di modellazione e la qualità dei dati all'interno dei flussi Scan-to-HBIM.



Figura 8 Orientamento del modello BIM secondo i parametri GoG, GoA e GoI, in funzione della disciplina e del tipo di analisi. Fonte: (Banfi, 2017; Banfi, 2019)

I parametri innovativi sono:

- Il ***Grado di Generazione (GOG)***, analisi del metodo di modellazione 3D degli oggetti. I ***GOG*** si suddividono ulteriormente in dieci e ognuno rappresenta le esigenze di modellazione e le tecniche per la generazione tridimensionale. Molto importanti i ***GOG 9-10*** perché si basano su *Nurbs* fondamentali per la creazione di elementi complessi e irregolari caratteristiche tipiche dell'architettura storica.

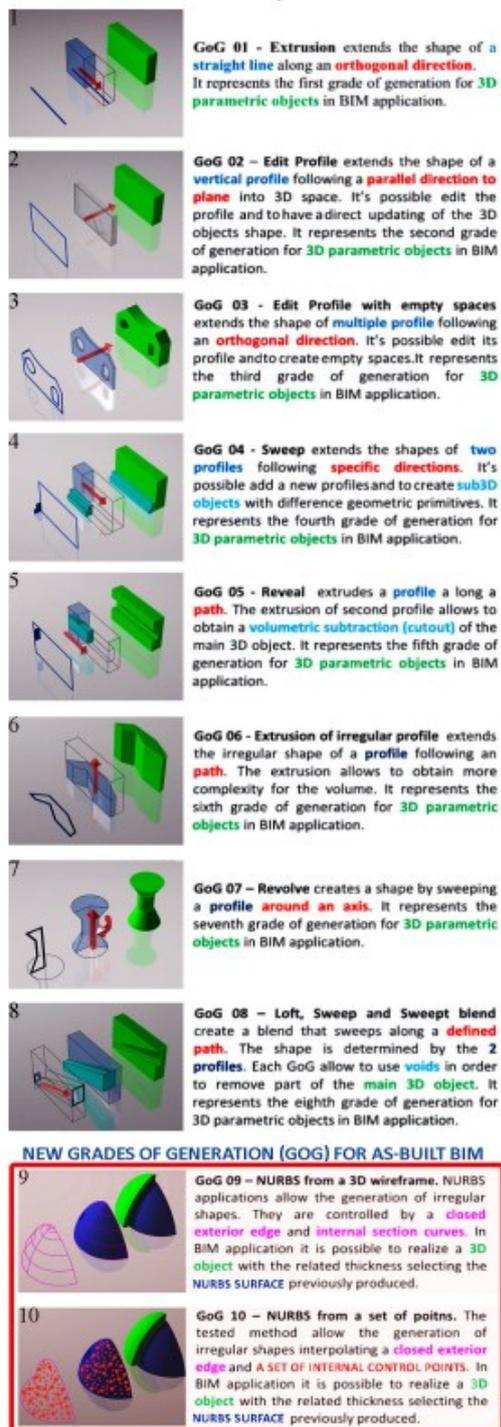


Figura 9 Gradi di Generazione per HBIM. Fonte: (Banfi, 2017)

- Il **Grado di Informazione (GOI)** definisce la quantità e il tipo di informazioni associate agli oggetti 3D: funzione, dimensione, dettagli sui materiali e proprietà fisiche e storiche. Il sistema di **Gol 03** permette agli utenti, su un sistema basato su *cloud*, di arricchire la conoscenza dell'edificio nel tempo.

- Il **Grado di Accuratezza (GoA)** definisce la precisione del modello digitale rispetto ai dati reali (nuvole di punti), si misura come deviazione tra punti e superficie dell'oggetto modellato.

Questi parametri sono integrati nel *Modeling & Management Information System (MMIS)*, un sistema che consente una gestione flessibile degli HBIM.

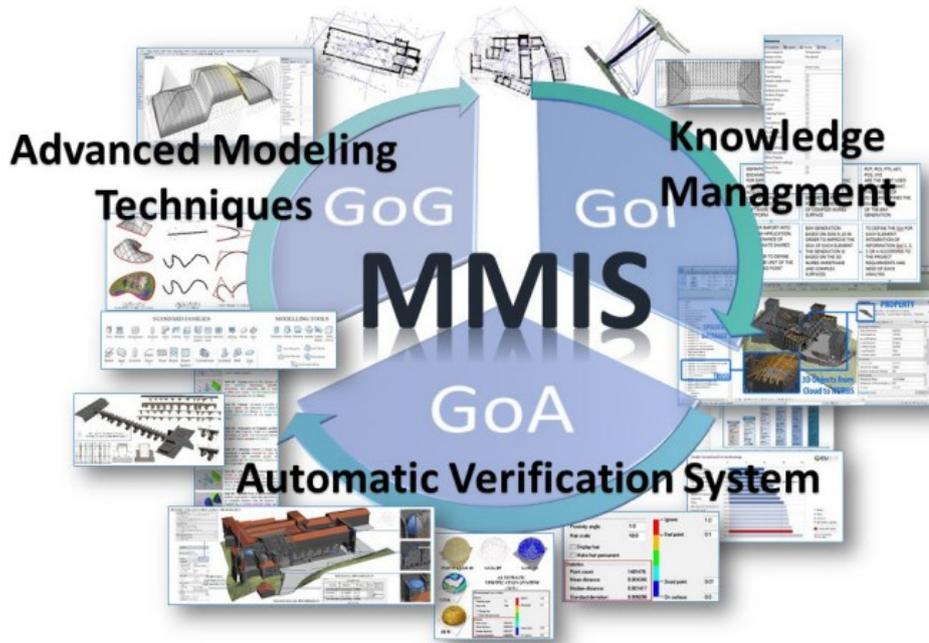


Figura 10 Schema di flusso del MMIS. Fonte: (Banfi, 2017)

In assenza di standard univoci per il patrimonio, l'HBIM ha sviluppato un approccio adattivo, in cui la definizione di obiettivi progettuali, la collaborazione tra enti e la flessibilità nella gestione del dato diventano elementi imprescindibili. L'interoperabilità rimane una delle sfide principali, e il bilanciamento tra peso computazionale, accuratezza geometrica e arricchimento semantico rappresenta un punto chiave del processo. La parametrizzazione, in questo caso, diventa uno strumento che non impone, ma ascolta il costruito, traducendo la sua complessità in un sistema informativo interrogabile e aggiornabile nel tempo.

3.3.2 Oggetti Parametrici e oggetti non parametrici

Oggetti Parametrici

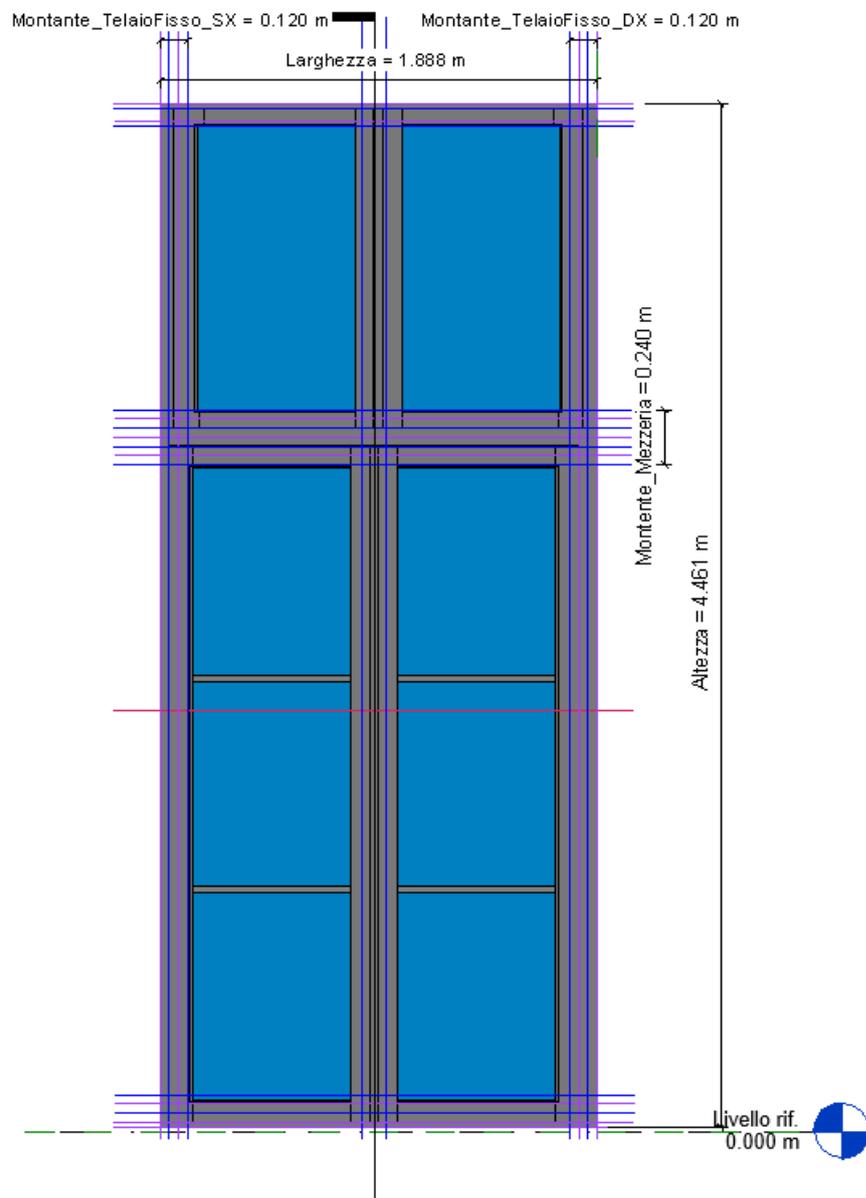


Figura 10 in immagine è visibile un oggetto parametrico, parte della modellazione della sala delle guardie svizzere, realizzato dall'autrice della presente ricerca.

Gli oggetti parametrici sono rappresentazioni digitali di forme o sistemi che vengono costruiti partendo da un numero limitato e definito di parametri. All'origine c'è sempre un modello matematico che governa quei parametri, che diventano vincoli rigidi: non si può uscire da questo schema se non riprogettando l'oggetto stesso. (Barazzetti, et al., 2015)

A differenza dei modelli CAD tradizionali, che spesso descrivono elementi in modo isolato e puramente geometrico, nel contesto BIM un oggetto parametrico, come un muro, una finestra, una trave, è un oggetto unico e compatto che incorpora dentro la sua identità dei parametri modificabili, impostati già nella fase di progettazione o di definizione della famiglia.

Le principali caratteristiche degli oggetti parametrici, soprattutto nel campo della modellazione generativa o VPL (Visual Programming Language), sono:

- Parametri limitati e predefiniti: ogni oggetto parametrico nasce da scelte fatte a monte, ad esempio nell'API del software, per cui non si può avere un parametro per ogni variabile possibile.
- Rappresentazione di forme geometriche semplici o complesse: possono descrivere sia geometrie lineari e standard (come rettangoli o cubi) che forme più articolate come superfici *NURBS (Non-Uniform Rational Basis Spline)*, ellissoidi o elementi curvilinei.
- Efficienza nell'archiviazione: rispetto ad altri tipi di modelli, hanno una struttura dati più compatta e gestibile, anche se la loro complessità può crescere nei modelli più avanzati. (Barazzetti, et al., 2015)

Un altro aspetto fondamentale legato agli oggetti parametrici riguarda le relazioni spaziali che instaurano tra loro. In ambiente BIM, ad esempio, un muro "sa" che sta inglobando una finestra o una porta, grazie a regole predefinite che facilitano non solo la progettazione ma anche le modifiche successive.

Questi oggetti, per essere davvero utili in contesti complessi come l'HBIM, devono essere integrati in ecosistemi basati su standard aperti, come il formato IFC (Industry Foundation Classes), che permette interoperabilità e condivisione dei dati tra software diversi e professionisti differenti. (Tang, et al., 2011)

Oggetti Non Parametrici

Gli oggetti non parametrici, invece, non si basano su un set limitato di parametri predefiniti. Sono modelli più "liberi", nati spesso nei flussi di lavoro legati alla digitalizzazione del

costruito, specialmente quando si lavora su oggetti As-Built, cioè esattamente come esistono nella realtà, con tutte le loro irregolarità.

Le principali caratteristiche degli oggetti non parametrici sono:

- Assenza di struttura semantica: vengono descritti attraverso dati grezzi come nuvole di punti o mesh triangolari, che non portano con sé informazioni su funzione, gerarchia o relazioni spaziali.
- Rappresentazione esplicita o implicita: la forma può essere descritta in maniera diretta (tramite i vertici e le facce della mesh, ad esempio) o in modo più astratto (come accade con istogrammi di normali o modelli di superficie interpolata).
- Elevata quantità di dati non strutturati: per loro natura sono modelli discreti e approssimativi, costituiti da enormi insiemi di punti o facce che descrivono solo la geometria visibile. (Dimitrov, et al., 2016) (Fougerolle, et al., 2005)

Dal punto di vista geometrico, gli oggetti non parametrici risultano spesso più accurati, soprattutto nei contesti di rilievo e rappresentazione *As-Is*, termine con cui si identifica lo stato reale e attuale dell'oggetto, deformazioni e imperfezioni comprese. (Pătrăucean, et al., 2015)

Tuttavia, sono meno compatti in termini di archiviazione e più complessi da integrare in flussi informativi strutturati come quelli dell'HBIM, proprio per la mancanza di dati semantici interni.

Interoperabilità tra oggetti parametrici e non parametrici

Gli oggetti non parametrici, come le nuvole di punti o le mesh, sono una base di partenza imprescindibile, soprattutto quando si parla di rappresentare la realtà *"as-built"* di un manufatto storico. Sono dati grezzi ma fondamentali, perché ci raccontano esattamente come si presenta l'oggetto nel momento in cui viene rilevato, con tutte le sue deformazioni e irregolarità. Tuttavia, da soli, non bastano: un modello BIM non può limitarsi a una nuvola di punti, serve trasformare questi dati in qualcosa di più strutturato, leggibile e soprattutto arricchito da informazioni. Il problema principale sta proprio in questa trasformazione. I software commerciali, soprattutto quelli pensati per il nuovo costruito, non sono sempre in grado di gestire le forme complesse che caratterizzano il patrimonio storico. Ecco perché

spesso si lavora con approcci ibridi: elementi regolari, come muri e pilastri, vengono modellati in modo parametrico, mentre le parti più complesse, irregolari o danneggiate, restano descritte da superfici basate su mesh o nuvole di punti semplificate. Un esempio efficace è l'uso delle NURBS, che permettono di ottenere superfici più fluide e controllabili partendo da una nuvola di punti, pur mantenendo una certa precisione geometrica. Questo approccio migliora la gestione delle forme libere, che sono tipiche degli elementi architettonici più complessi. (Barazzetti, et al., 2015)

Tutto questo ha senso solo se si garantisce un minimo di interoperabilità tra i diversi software, motivo per cui è fondamentale lavorare con standard aperti come l'IFC. Il passaggio dai dati grezzi a oggetti parametrici pronti per l'HBIM richiede metodo, attenzione e competenze trasversali, ma solo così si può ottenere un modello utile, completo e realmente spendibile nei processi di gestione o conservazione. (Tang, et al., 2011)

Confronto tra oggetti parametrici e non parametrici:

Caratteristiche	Oggetti Parametrici	Oggetti non Parametrici
Definizione	<ul style="list-style-type: none">• Descritti da parametri matematici• Derivati da primitive geometriche	<ul style="list-style-type: none">• Non hanno parametri intrinseci• Non sono derivati da primitive geometriche
Struttura dati	<ul style="list-style-type: none">• Astratti, con molte relazioni tra singoli punti o dati.	<ul style="list-style-type: none">• Discreti o approssimati, alto numero di dati non strutturati.
Ricchezza semantica	<ul style="list-style-type: none">• Ricchi di dati semantici (relazioni tra parametri, regole)	<ul style="list-style-type: none">• Non presentano informazioni semantiche
Accuratezza	<ul style="list-style-type: none">• Rappresentazione di oggetti "as-is" può comportare una perdita di accuratezza	<ul style="list-style-type: none">• Ottimali per la modellazione "as-is", maggiore accuratezza
Flessibilità	<ul style="list-style-type: none">• Poco flessibili per forme complesse (limiti delle librerie primitive)	<ul style="list-style-type: none">• Flessibili, possono generare forme geometriche libere e irregolari
Compattezza e Archiviazione	<ul style="list-style-type: none">• Compatti	<ul style="list-style-type: none">• requisiti di archiviazione elevati
Efficienza computazionale	<ul style="list-style-type: none">• Inefficienza computazionale nella gestione delle forme complesse	<ul style="list-style-type: none">• Efficienza computazionale per le forme complesse
Applicazioni tipiche	<ul style="list-style-type: none">• Tipiche applicazioni CAD e BIM.	<ul style="list-style-type: none">• Tipiche applicazioni in ambito di modellazione VPL e As-Built
Relazioni	<ul style="list-style-type: none">• Inserimento di regole e vincoli permettendo la rigenerazione automatizzata	<ul style="list-style-type: none">• Conversione in oggetto parametrico complessa

Figura 11 tabella riassuntiva sul confronto tra oggetti parametrici e non parametrici. Schema elaborato dall'autrice.

Figura 5 schema del confronto tra oggetti parametrici e oggetti non parametrici. Schema elaborato dall'autrice.

3.3.3 Modellazione VPL avanzata: point-cloud based

L'incremento costante della complessità nella documentazione e nella gestione del patrimonio culturale, specialmente nel caso degli edifici storici, ha spinto il settore verso la sperimentazione di metodi più dinamici rispetto ai tradizionali flussi di lavoro Scan-to-BIM. (Li, et al., 2025)

L'idea di fondo non è soltanto quella di ottimizzare i tempi o ridurre i costi, ma soprattutto di trovare un equilibrio tra accuratezza geometrica, efficienza operativa e sostenibilità nella produzione dei modelli informativi.

Uno degli obiettivi principali è velocizzare i processi di modellazione e trasformazione dei dati reality-based in oggetti BIM coerenti e informati. Attraverso interfacce grafiche composte da nodi e connessioni, i VPL permettono di operare senza scrivere codice, ma definendo logicamente delle azioni, relazioni. Trasformazioni, accessibili anche a chi non ha competenze di programmazione.

Il vantaggio più immediato è l'automazione: operazioni ripetitive come l'estrazione di profili, il posizionamento sequenziale di oggetti architettonici, o la conversione di dati da rilievo in geometrie, vengono semplificate e rese scalabili. Non solo la modellazione visiva consente di gestire anche geometrie complesse, come soffitti cassettonati, volte storiche si possono anche ottenere forme coerenti e metricamente controllabili.

Questa modellazione si basa spesso su dati point-cloud based (Rocha, et al., 2024): nuvole di punti acquisite da rilievi laser o fotogrammetrici, successivamente trattate e utilizzate come base per la generazione geometrica. I VPPL permettono di integrare direttamente queste nuvole nel flusso di lavoro, dialogando con librerie Python (come Open3D o NumPy) per analizzare, filtrare e interpolare dati anche al di fuori delle capacità native del software BIM.

Uno dei passaggi chiave è la classificazione semantica dei dati di rilievo, realizzabile tramite algoritmi di machine learning che identificano e suddividono gli elementi architettonici all'interno della nuvola. Le classi individuate vengono poi elaborate nei VPL per generare mesh o superfici continue, da importare in ambienti BIM e collegare a famiglie parametriche.

Questa operazione consente di mantenere una coerenza tra forma, struttura informativa e livello di accuratezza rischio del progetto.

Quando il fine è la miglior definizione geometrica, specialmente per l'interoperabilità con altri ambienti di calcolo (per esempio nelle simulazioni energetiche o termiche), la modellazione VPL consente un reverse modeling dettagliato. Si genera così un modello che, pur mantenendo un legame con la nuvola di punti, offre geometrie più controllate, esportabili informati interoperabili come IFC e pronte per ulteriori analisi.

Un esempio concreto dell'applicazione della logica VPL nel contesto del patrimonio culturale è rappresentato dalla digitalizzazione dell'Indice di Qualità Muraria (IQM). In questo caso, l'utilizzo combinato di ambienti come Grasshopper e Autodesk Revit ha permesso non solo di semplificare il processo di calcolo dei parametri richiesti dalla normativa, ma anche di restituire visivamente, direttamente all'interno del modello BIM, la classificazione delle murature in base alla loro qualità. L'assegnazione di una determinata classe (A, B, C) viene automatizzata e resa leggibile attraverso la colorazione delle istanze murarie, con un risparmio di tempo significativo e una riduzione del margine di errore umano. In questo modo, il modello non è più soltanto una rappresentazione geometrica, ma diventa uno strumento attivo di analisi e supporto alle decisioni.

Dal punto di vista informativo, il VPL offre anche la possibilità di strutturare e ordinare il dato attraverso modelli semantici, facendo riferimento a standard come CIDOC-CRM o IFC (Li, et al., 2025), che permettono di collocare gli oggetti all'interno di un sistema di relazioni esplicite. La modellazione si arricchisce così di significato, diventando più leggibile, interoperabile e riutilizzabile, sia all'interno del singolo progetto che in un'ottica di condivisione più ampia. L'associazione di categorie architettoniche, materiali, epoche storiche, stati di conservazione o interventi passati a specifici oggetti digitali apre alla possibilità di costruire modelli informativi narrativi, capaci di connettere geometria e conoscenza.

L'efficacia di questi strumenti non si limita alla scala del dettaglio architettonico. Al contrario, la scalabilità del metodo ne consente l'utilizzo anche su interi complessi monumentali o su sistemi urbani articolati, integrando dati provenienti da rilievi, archivi, catasti o database topografici. In questo modo, si possono costruire veri e propri ambienti collaborativi di

lavoro, Common Data Environment (CDE), che facilitano l'interoperabilità tra soggetti diversi e la gestione multilivello delle informazioni.

Nonostante i risultati ottenuti, è opportuno ricordare che restano aperte alcune criticità, come la necessità di un intervento manuale in alcune fasi del processo, l'assenza di protocolli consolidati per il patrimonio culturale all'interno dell'ecosistema HBIM, o ancora la fragilità di alcuni ambienti VPL soggetti a rapidi aggiornamenti e obsolescenze.

Tuttavia, le prospettive future sono incoraggianti. L'integrazione di strumenti basati sull'intelligenza artificiale, come i Large Language Models (LLM) (Triantafyllidis, et al., 2025), apre nuovi scenari nella modellazione automatica, nella generazione di script e nell'interpretazione semantica di documentazione storica. Anche l'interconnessione con sistemi GIS e tecnologie Web 3.0, finalizzata alla creazione di *digital twin* orientati alla sostenibilità, rappresenta un'area di sviluppo già in atto.

In definitiva, la modellazione avanzata basata su VPL e nuvole di punti non è solo una nuova tecnica progettuale, ma un cambio di paradigma. Un passaggio verso un approccio alla documentazione del patrimonio che è allo stesso tempo più consapevole, più interrogabile e più connesso con le sfide attuali della digitalizzazione.



Figura 12 Tabella riassuntiva dei motivi che giustificano l'utilizzo della modellazione avanzata VPL. Schema elaborato dall'autrice.

4. Il caso studio a Palazzo Reale, Torino: sala delle Guardie Svizzere.

La digitalizzazione del patrimonio culturale è oggi una delle sfide più complesse ma inevitabili da affrontare nell'ambito della conservazione, del restauro e della gestione degli edifici storici. In questo contesto si inserisce il progetto "TAKE-CARE: i Musei Reali di Torino e la conservazione di un sistema complesso di beni", promosso dal bando Compagnia San Paolo PRIMA, e condotto in collaborazione con M.Feroggio, Musei Reali Torino S.Della Torre, Politecnico di Milano; R.Moioli; A.Spanò, Politecnico di Torino. (Feroggio, et al., 2024) Questo progetto mira a sviluppare un sistema di conservazione preventiva e programmata promuovendo la cura continua del bene anziché interventi emergenziali.

Il progetto si basa sulla ricerca e lo sviluppo sul processo di digitalizzazione della conservazione attraverso sistemi informativi interoperabili e applicazioni di tecnologie innovative per il rilievo 3D e la modellazione HBIM, per la creazione di un *digital twin* e una gestione efficiente delle informazioni.

Il modello, quindi, è stato sviluppato in base alle esigenze del piano di conservazione, si è creando un linguaggio semantico coerente tra modello e piano stesso. Ogni elemento nel piano di conservazione è stato classificato e corredato di una nomenclatura specifica.

La rappresentazione tridimensionale finale sarà quindi un modello pienamente integrato con il piano di conservazione.

Il caso studio scelto si trova nel centro storico di Torino, all'interno del Palazzo Reale, più precisamente nella Sala delle Guardie Svizzere, uno degli ambienti più articolati e rappresentativi del complesso. Questo salone, conosciuto anche come Salone degli Svizzeri, era originariamente destinato all'accoglienza cerimoniale e alla sorveglianza degli spazi privati della corte. Affacciato sugli Appartamenti Reali e adiacente alla Cappella della Sindone, ha avuto una funzione di collegamento tra le diverse zone del palazzo.



Figura 13 Inquadramento geografico del manufatto storico in oggetto della presente ricerca. L'immagine mostra una visione dall'alto del centro storico di Torino, con il complesso del Palazzo Reale. Immagine salvata da Google Earth Pro nell'anno in corso.

L'ambiente, rinnovato tra il 1835 e il 1840 da Pelagio Palagi, è riccamente decorato con stucchi, fregi e motivi ispirati all'Estremo Oriente. Il soffitto cassettonato ottocentesco rappresenta uno degli elementi più rilevanti, insieme alla meridiana a camera oscura, tracciata nel XVII secolo e recentemente ripristinata nel 2023. La decorazione pittorica comprende anche opere dei Fratelli Fea, risalenti al 1660, e un sistema compositivo che alterna pieni e vuoti in modo non simmetrico.



Figura 14 Immagine rappresentativa della Sala delle Guardie Svizzere, si noti la complessità degli apparati architettonici e della complessità di dettagli che caratterizzano la sala. Immagine proveniente dal sito ufficiale dei Musei Reali, consultato nel 2024. Fonte: <https://museireali.beniculturali.it/>

La scelta di questa sala è legata proprio alla sua complessità: si tratta di uno spazio ricco di decorazioni plastiche, superfici curvilinee, geometrie non ortogonali e forme storicamente deformate. Elementi come gli sguinci delle finestre, i ciellini inclinati, le specchiature non allineate e le irregolarità del soffitto mettono in crisi la logica rigida della modellazione BIM tradizionale.

Proprio per questo, il Salone degli Svizzeri si è rivelato il contesto ideale per testare un flusso operativo completo: dal rilievo metrico e fotogrammetrico, alla preparazione dei dati, fino alla modellazione HBIM e all'integrazione della VPL. L'uso della modellazione visuale ha permesso di affrontare con maggiore elasticità alcune delle criticità legate alla restituzione geometrica di elementi storici complessi, dimostrando che, anche in un contesto così carico di stratificazioni e irregolarità, è possibile costruire un flusso digitale coerente e replicabile. Questo lavoro si inserisce quindi in un percorso di ricerca applicata, con l'obiettivo di esplorare le potenzialità della modellazione parametrica visuale come strumento concreto all'interno di un processo HBIM rivolto al patrimonio.

4.1 Lavoro sul Caso studio

4.1.1 Acquisizione ed elaborazione dei dati fotogrammetria e LiDAR

L'intervento è stato progettato sulla base di dati tridimensionali acquisiti attraverso la combinazione di diverse tecnologie geomatiche, che hanno permesso di ottenere un rilievo completo e coerente, adatto a sostenere un processo HBIM avanzato. In particolare, si è scelto di integrare la scansione laser basata su tecnologia LiDAR con la fotogrammetria digitale terrestre ad alta risoluzione. L'obiettivo è stato quello di armonizzare la precisione geometrica con una qualità cromatica adeguata, fondamentale per la comprensione architettonica e decorativa dell'ambiente.

Scansione LiDAR e trattamento dei dati

Il rilievo con laser scanner è stato effettuato con strumentazione FARO Focus, con successiva elaborazione su software SCENE. I dati acquisiti sono stati importati in formato **.e57** e sottoposti a un processo di normalizzazione e registrazione, sfruttando punti di controllo topografici e sistemi di auto-registrazione.

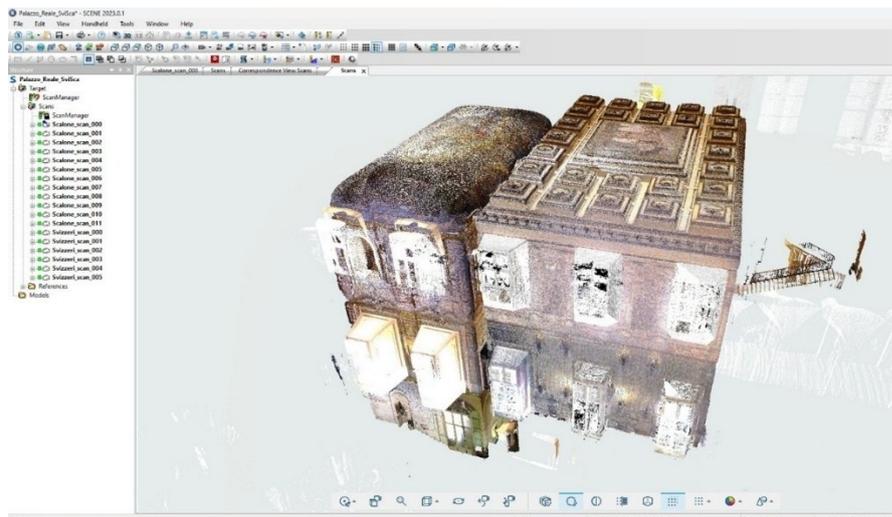


Figura 15 nuvola di punti della sala delle guardie svizzere, elaborata dall'autrice in seguito al rilievo laser scanner e alle operazioni preliminari di registrazione e normalizzazione.

La registrazione automatica è stata integrata con un affinamento manuale per ridurre i residui numerici, intervenendo sugli allineamenti sia nella registrazione per forma (ICP) sia in quella tramite target al fine di garantire una maggiore precisione delle scansioni.

Completata la verifica della coerenza metrica, i dati finali sono stati esportati in formato *.ply* e *.las*, compatibili con i software di modellazione e analisi successivi.

Per migliorare la qualità complessiva delle nuvole di punti e alleggerire la gestione dei dati in vista delle elaborazioni future, si è effettuato un ulteriore intervento con CloudCompare. La pulizia è stata eseguita manualmente, utilizzando visualizzazioni in sezione e operazioni di selezione precisa per rimuovere elementi di disturbo (strumentazioni temporanee, persone, superfici riflettenti). È stato inoltre applicato un filtraggio selettivo della densità, funzionale a snellire le successive lavorazioni.

Una distinzione importante va fatta in merito alla gestione separata delle nuvole di punti: per motivi legati sia alla dimensione dei dati che alla potenza di calcolo, si è scelto di segmentare le nuvole in porzioni distinte, elaborate singolarmente. Solo successivamente, nelle fasi finali, è avvenuta la ricomposizione complessiva per garantire coerenza e continuità. Questa scelta si è resa necessaria anche in funzione della differenza tra le macchine utilizzate: mentre i PC del laboratorio di geomatica per i beni culturali – Lab G4CH del Politecnico, più performanti, hanno gestito l'elaborazione delle nuvole principali, le lavorazioni più leggere e mirate sono state svolte sul PC personale, limitando il rischio di errori o rallentamenti dovuti a sovraccarichi di dati.

Fotogrammetria digitale e ortofoto

Parallelamente al rilievo LiDAR, si è realizzato un rilievo fotogrammetrico mirato alla ricostruzione 3D delle superfici decorative e di maggior dettaglio, in particolare il soffitto cassettonato e l'apparato pittorico delle pareti della Sala delle Guardie Svizzere. Per questa fase è stato utilizzato il software Metashape (Agisoft SARL).

La fotogrammetria è stata calibrata e georeferenziata sfruttando punti di controllo (GCP) ricavati direttamente dalle coordinate ottenute dalla nuvola LiDAR. Questo ha permesso di garantire coerenza metrica tra i due set di dati, facilitando l'integrazione all'interno del modello HBIM.



Figura 16 Vista della cartella con le immagini impiegate in Agisoft Metashape per la generazione del modello fotogrammetrico.

Un ulteriore intervento di alta precisione è stato svolto sulla griglia del cassettonato, fondamentale per la successiva modellazione.



Figura 17 Screenshot tratto da CloudCompare. Si osservano i punti selezionati per costruire la griglia uniforme: dal 'Point #0' al 'Point #7' sono stati scelti i punti cardinali, ovvero i quattro angoli esterni e quelli interni. A seguire, si è mantenuta una selezione omogenea, come si nota dal posizionamento dei 'Point #11' e 'Point #12' rispetto ai 'Point #16' e 'Point #17'. La regolarità nella scelta dei punti di controllo è fondamentale per garantire coerenza nella griglia.

Dopo l'allineamento delle fotografie e la creazione di un primo modello 3D, è stata definita una serie di punti di controllo estratti dalla nuvola LiDAR e integrati in Metashape. Tale passaggio ha previsto una collimazione manuale dei punti e un'ottimizzazione dei parametri, con particolare attenzione alla riduzione degli errori di allineamento, riportati entro margini accettabili inferiori a 1 cm.

Conclusa la fase di collimazione e controllo metrico, si è proceduto con la generazione della nuvola di punti densa e successivamente con la creazione della mesh 3D.

Il modello così ottenuto, grazie al dettaglio della nuvola densa e al numero elevato di facce poligonali della mesh, ha consentito di rappresentare in maniera accurata le geometrie complesse e i dettagli architettonici della sala.

In questa fase è stata altrettanto fondamentale la creazione delle texture ad alta definizione, successivamente ottimizzate tramite interventi mirati in Photoshop volti a migliorarne la qualità in modo da ottenere un risultato uniforme.

Si è lavorato sul bilanciamento cromatico, sulla correzione delle ombre e sull'uniformità generale dei materiali, con particolare attenzione agli affreschi e ai fregi decorativi. Questo

passaggio si è reso necessario a causa di alcune immagini sovraesposte, dovute alla forte luce naturale proveniente dalle finestre, che ha richiesto un lavoro di rielaborazione per garantire il miglior risultato possibile. Le immagini corrette sono state reimportate in Metashape, permettendo la ricalibrazione finale dell'ortofoto.



Figura 18 L'immagine rappresenta il raffronto tra il primo tentativo di ortofoto del cassettonato e il secondo tentativo migliorativo successivo alla modifica delle immagini di riferimento iniziali così da migliorarne la qualità. L'elaborato è stato sviluppato dall'autrice della ricerca.

Il risultato è stato una ortofoto planare ad alta risoluzione e una mesh texturizzata, strumenti indispensabili sia per la documentazione scientifica che per l'integrazione nei successivi processi di modellazione HBIM.

L'intero processo di acquisizione, elaborazione e integrazione dei dati ha costituito la base imprescindibile per lo sviluppo del modello HBIM e per le successive sperimentazioni di modellazione avanzata. La qualità e la coerenza dei dati, ottenuti grazie a un flusso di lavoro rigoroso ma flessibile, si sono rivelate determinanti per garantire un approccio affidabile alla digitalizzazione e conservazione dell'ambiente architettonico oggetto di studio.

4.1.2 Preparazione dei dati reality-based e modello HBIM

Dato il progetto "TAKE-CARE", in cui inserire questa tesi, il primo approccio processuale alla modellazione è stato quello dell'informazione. Il modello della stanza si è orientato verso la

stretta relazione con il piano di conservazione e la modellazione dei singoli elementi ne è risultata influenzata.

Questa relazione mi ha portato alla scelta una modellazione di famiglie nidificate, proprio per fare in modo che ogni elemento fosse riconoscibile e associabile in modo univoco.

Questo tipo di processo, di relazione tra oggetti e semantica è fondamentale rispetto al processo HBIM. Durante l'iter progettuale, sono stati, inoltre, creati dei parametri condivisi; quindi, ogni elemento deve avere determinati parametri condivisi: ogni elemento del modello possiede determinati parametri, sia identificativi che semantici, che permettono la loro esportazione e consultazione. Ad esempio, se viene creato un file IFC questi parametri condivisi potranno essere letti al suo interno senza la necessità del file nativo di Autodesk Revit.

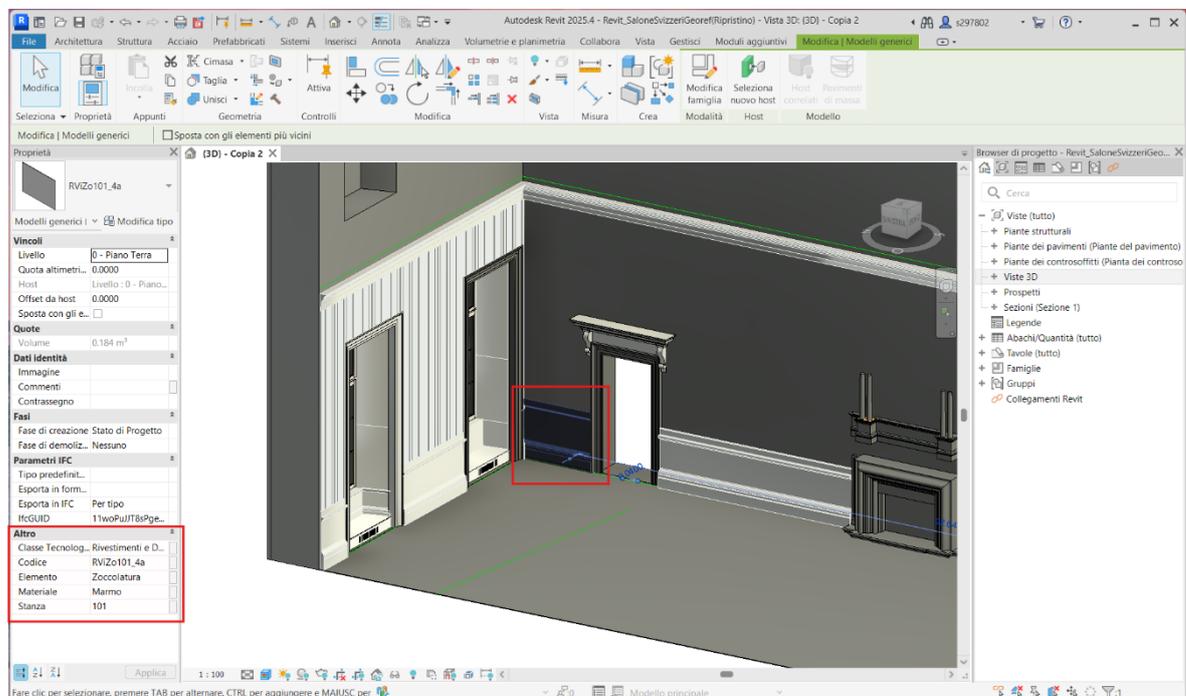


Figura 19 Nell'immagine vediamo evidenziati i parametri condivisi: relazione tra oggetto e semantica.

Dopo l'acquisizione e l'elaborazione dei dati iniziali, il primo passaggio è avvenuto tramite Autodesk ReCap: programma, che ci permette di georeferenziare la nuvola di punti attraverso una serie di passaggi abbastanza semplici. Inoltre, il passaggio da Autodesk ReCap è obbligatorio perché al suo interno sono state inserite le nuvole di punti in modo separato, come già detto nel precedente paragrafo. Questo è avvenuto per via della mole di punti e dopo la georeferenziazione è stata salvata la nuvola unificata in formato .rpc leggibile da Autodesk Revit. Per la georeferenziazione dei dati, si è scelto di utilizzare un metodo pratico,

che consiste nella troncatura delle coordinate originali, solitamente molto elevate, e nella riduzione delle cifre significative, impostando poi manualmente una nuova origine locale. Questa operazione è fondamentale per la gestione del posizionamento della nuvola di punti all'interno dello spazio di lavoro, ma richiede attenzione: è infatti necessario annotare e conservare le coordinate del nuovo punto di origine, che saranno indispensabili nella fase successiva, quando si dovrà inserire il "punto base progetto" all'interno dell'ambiente di Autodesk Revit. Ora è possibile entrare nel vivo della modellazione HBIM: il primo passo è il collegamento della nuvola di punti nello spazio di lavoro di Autodesk Revit, così da avere il nostro riferimento reality-based su cui lavorare e sviluppare la modellazione parametrica degli elementi architettonici.

All'interno delle elaborazioni nel processo HBIM di questa tesi sono stati utilizzati molti programmi di supporto creati appositamente per la modellazione del patrimonio storico e la semplificazione di modelli rigidi, come Autodesk Revit, creati principalmente per il costruito contemporaneo. Come prima operazione concreta si è proceduto alla modellazione dei setti murari confinanti della Sala delle Guardie Svizzere, oggetto principale della ricerca. Già in questa fase si è trovato il primo ostacolo, molto comune negli edifici storici: i muri non risultavano rettilinei, rendendo l'assetto dell'ambiente più complesso della modellazione BIM.

Il software Autodesk Revit, adottando plug-in come *FARO As-Built*, cerca di implementare i propri processi in ottica HBIM. All'interno della modellazione è stato utilizzato per la creazione dei setti murari e per le analisi di deviazione delle superfici.

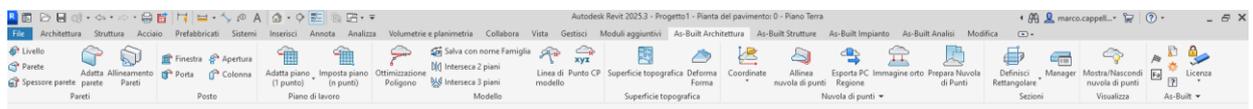


Figura 20 L'immagine rappresenta il menù principale del plug-in di FARO As-Built, in particolare il modulo As-Built Architettura.

L'utilizzo di questo supporto ha permesso di poter erigere i setti murari attraverso il riconoscimento automatico dell'andamento dei muri mediante l'utilizzo di un tool principali del plug-in "Adatta parete".

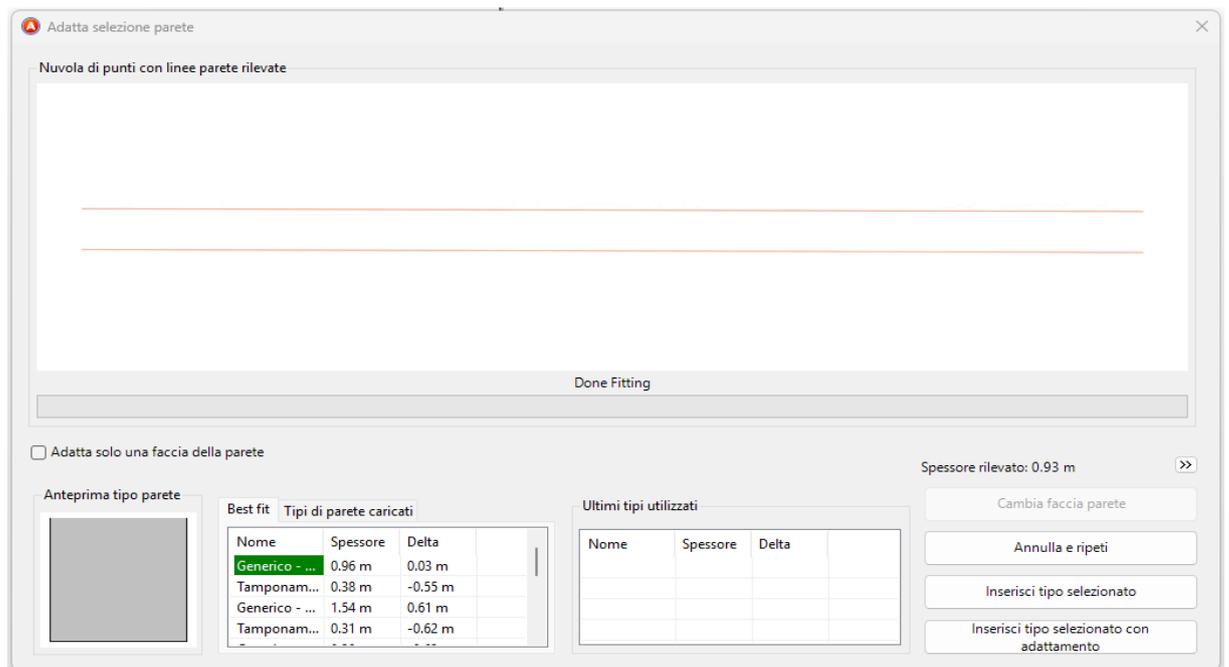


Figura 21 Rappresentazione della finestra di adattamento parete, di *As-Built Architettura*.

Grazie a questa tipologia di software aggiuntivi, è possibile ottenere i setti murari con le corrette inclinazioni rispetto all'andamento delle murature. In assenza di tali strumenti, questa operazione avrebbe richiesto una rotazione manuale di ciascun muro, comportando un notevole dispendio di tempo e un aumento della possibilità di errore. Di seguito si riportano i quattro muri ottenuti, fondamentali come base iniziale per la modellazione reality-based.

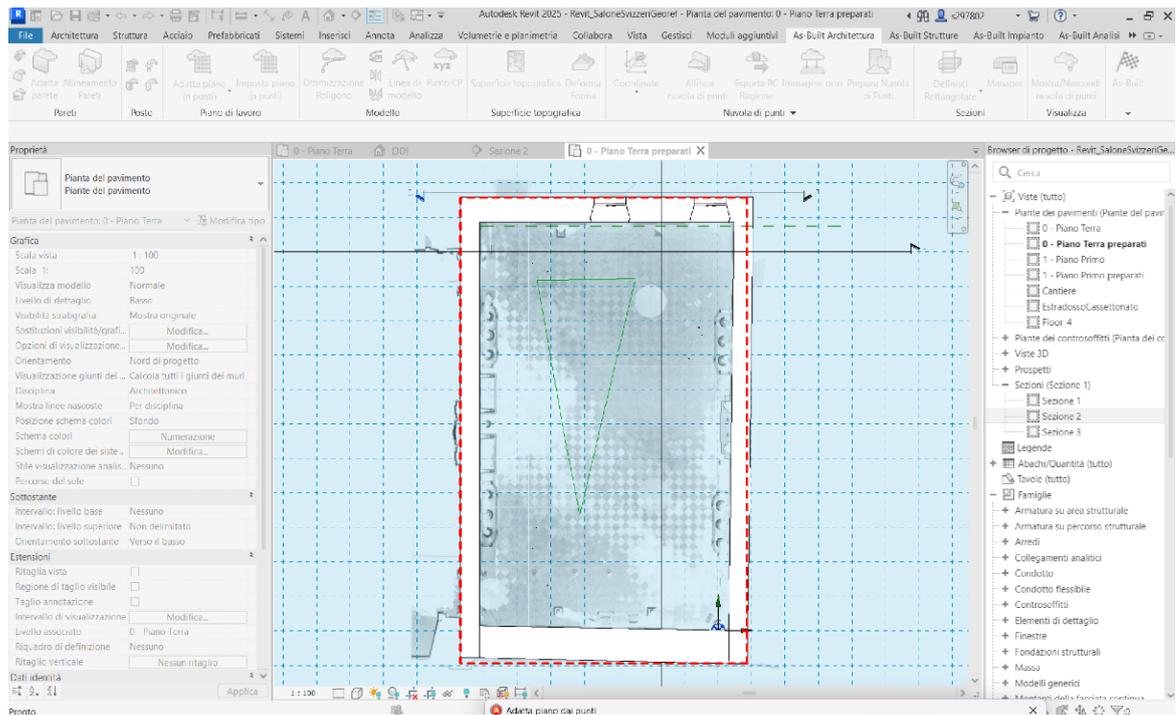


Figura 22 L'immagine rappresenta il momento in cui sono stati generati i muri all'interno dell'ambiente di modellazione Autodesk Revit. Il riquadro rosso tratteggiato, aggiunto in fase di rielaborazione grafica dall'autrice del presente elaborato, evidenzia le pareti non rettilinee, già intuibile osservando la griglia azzurra di riferimento, anch'essa tratteggiata.

Per garantire la modellazione reality-based è stata fatta un'analisi sui setti murari, sempre attraverso il plug-in, il calcolo si basa sulla distanza tra punto della nuvola e superficie del modello.

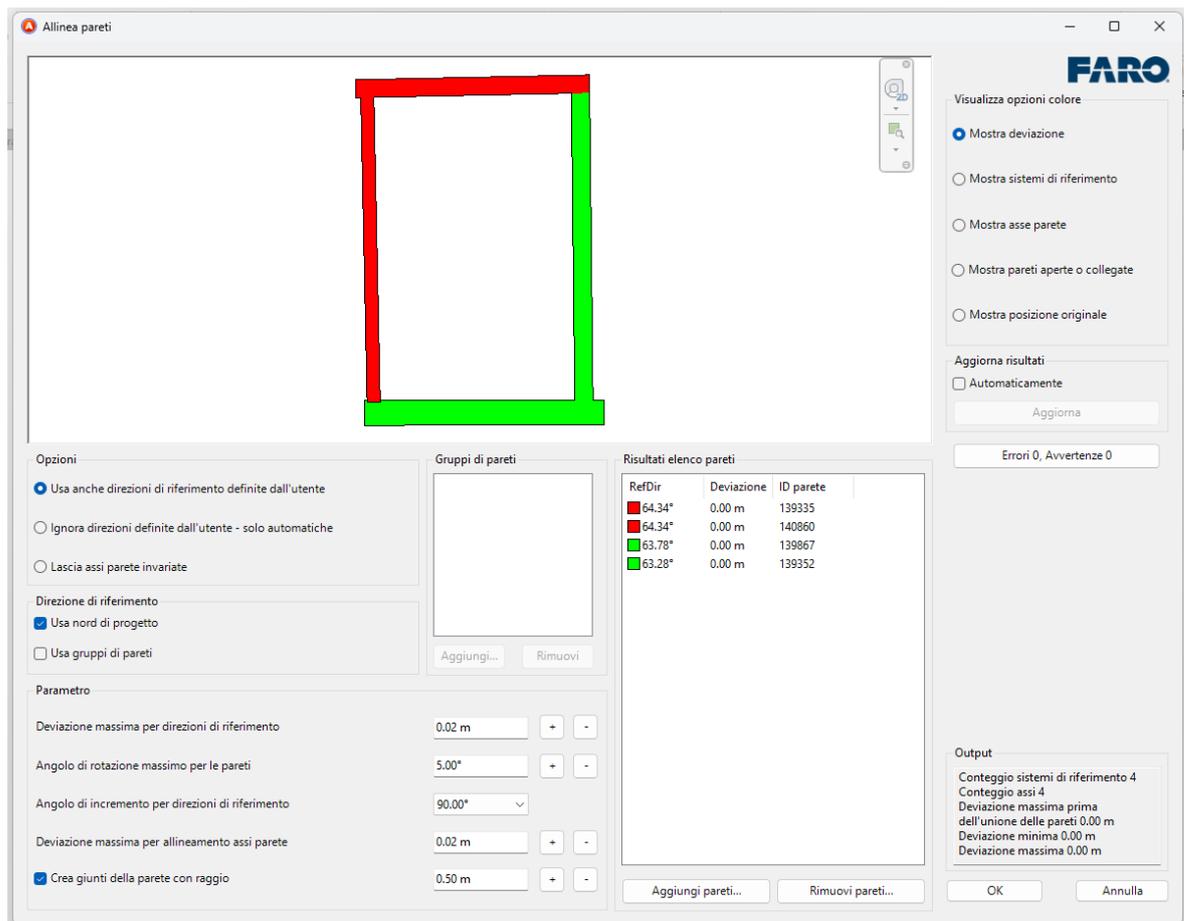


Figura 23 Rappresentazione delle deviazioni dei setti murari attraverso il calcolo di analisi in *As-Built Analisi*.

Una delle sfide principali all'interno della modellazione tradizionale sono stati due elementi fondamentali e caratteristici della stanza: le finestre e il soffitto cassettonato.

Questi elementi si sono riusciti a modellare con alcune difficoltà relative alla complessità degli elementi architettonici stessi; in questa ricerca, infatti, vedremo la modellazione sia delle finestre che del cassettonato e, di quest'ultimo, proprio per via delle rigidità della modellazione tradizionale, vedremo una metodologia con supporto della VPL, che ci permetterà di utilizzare un metodo alternativo e più aderente alla realtà rispetto alla modellazione tradizionale. A seguire, si analizzerà la modellazione di questi due elementi secondo il metodo tradizionale, direttamente su Autodesk Revit e attraverso famiglie nidificate.

- *Blocco murario finestrato*

Il primo elemento che andremo ad affrontare è il *blocco murario finestrato*: la scelta di chiamarlo così deriva dal fatto che non si tratta esclusivamente dell'elemento finestra, ma all'interno della modellazione si è optato per la creazione di una famiglia nidificata che comprende il vano finestra con sguinci marcati e ghiera modanata, insieme all'intero sistema decorativo che lo completa.



(a)



(b)

Figura 24 (a) Fotografia del blocco murario finestrato, scattata in situ dall'autrice della presente ricerca; (b) Fotografia del blocco murario finestrato, scattata in situ dall'autrice della presente ricerca

In particolare, il *blocco* include le lastre di marmo verde che rivestono la muratura perimetrale: parte di queste non sono in marmo ma sono elementi sostituiti con lastre che riproducono il materiale con la tecnica della marmorizzazione. A questo si aggiunge la presenza del sottofinestra caratterizzato da un davanzale interno che si inserisce con continuità nell'apparato lapideo. L'intero *blocco murario finestrato* risulta estremamente complesso e articolato e richiede una strategia modellativa attenta e coerente con gli elementi reali.

Il *blocco murario finestrato* è stato quindi strutturato con la creazione di una famiglia generica base. Quest'ultima è la famiglia in cui verranno inseriti tutti gli elementi descritti sopra: il vuoto della finestra, l'elemento finestra e la ghiera. Questa è la struttura gerarchica definita in una fase preliminare di analisi e consapevolezza degli elementi. La scelta è stata adottata perché essendo le murature irregolari, l'elemento ghiera, se modellato come famiglia autonoma, anziché nella famiglia nidificata del *blocco murario finestrato*, avrebbe richiesto di essere inserito e ruotato manualmente per ciascuna finestra in modo da seguire l'inclinazione della muratura. Optando invece per la soluzione descritta, ogni *blocco* viene caricato nel progetto e segue sistematicamente l'orientamento del muro.

Un ulteriore ostacolo che ha contribuito ad allungare i tempi di modellazione è stato rappresentato dal celino, caratterizzato in pianta da sguinci laterali conformati secondo lo sfondato murario e, in sezione trasversale, da una pendenza, complicando così la definizione di un unico volume di sottrazione. Dopo diverse valutazioni si è giunti a una soluzione funzionale, che tuttavia ha reso l'operazione complessa e ha incrementato i tempi di modellazione. In questa tesi l'attenzione si è focalizzata sull'elemento cassettonato, ma problematiche simili, legate alle bucatore finestrate, avrebbero meritato uno studio dedicato nell'ambito della modellazione parametrica con metodologie VPL.

Nel contesto operativo di Revit, la creazione di un vuoto solido può avvenire tramite sottrazione per estrusione in pianta o in sezione, ma entrambe le soluzioni risultano limitanti in quanto non consentono di controllare contemporaneamente geometria in pianta e in sezione. La forma richiesta era assimilabile a un parallelepipedo irregolare, con lati inclinati in pianta per adattarsi allo sguincio e con un'altezza crescente dal lato interno verso l'esterno. La soluzione adottata, seppur efficace, si è rivelata macchinosa: il volume di sottrazione è stato suddiviso in più porzioni verticali, impostando linee guida in pianta e in sezione trasversale per definire i limiti, e creando infine i vuoti tramite il comando Unione, integrando i due piani di controllo.

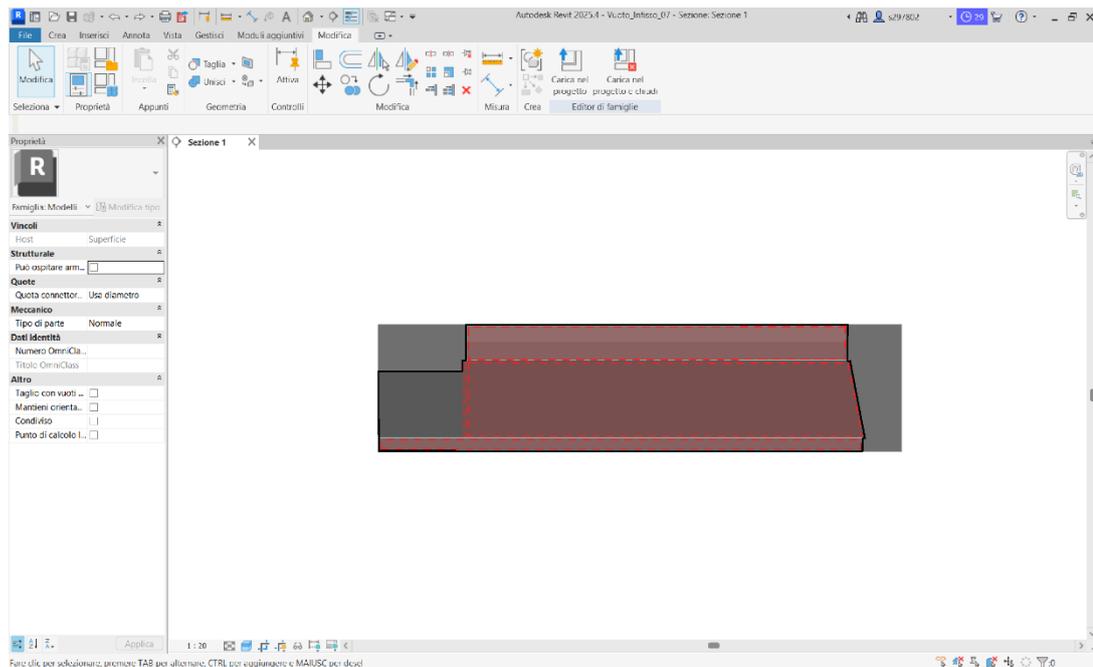


Figura 25 Rielaborazione grafica da Autodesk Revit. L'immagine è stata ottenuta tramite uno screenshot e successivamente elaborata per evidenziare i vuoti verticali che si sono dovuti creare per gestire la problematica del celino. Questi vuoti sono segnalati con una cornice tratteggiata rossa e un leggero campimento. La rielaborazione è stata svolta direttamente dall'autrice della presente ricerca.

In seguito alle difficoltà trovate e risolte si è proceduto alla modellazione dei restanti elementi del *blocco murario finestrato*, aggiungendo alla famiglia base l'infisso finestrato vero e proprio e caricando così tutta la famiglia nidificata all'interno dello spazio di disegno di progetto. Questi passaggi sono stati eseguiti per tutti gli infissi e inseriti come famiglie nidificate all'interno del progetto.

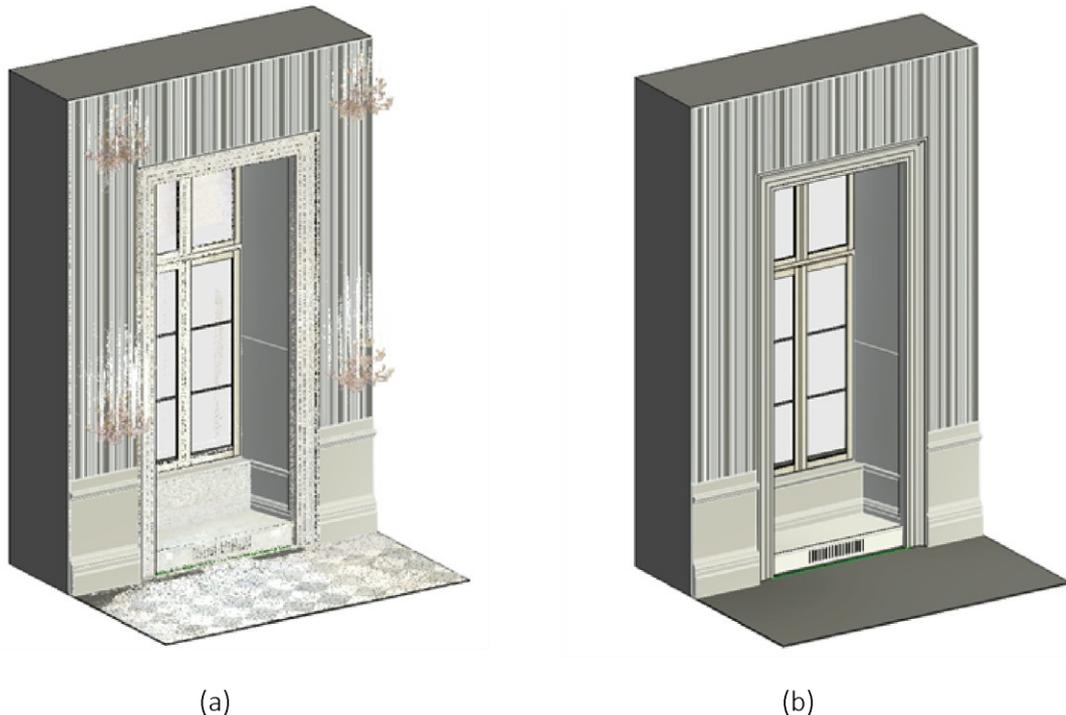


Figura 26 (a) L'immagine rappresentata è il blocco murario finestrato con la sovrapposizione della nuvola di punti; (b) rappresentazione del blocco murario finestrato con tutti i suoi elementi architettonici caratterizzanti.

- ***Soffitto cassettonato ligneo della sala delle Guardie Svizzere***

Il secondo elemento più complesso della modellazione è stato, come anticipato, il soffitto cassettonato, modellato con approccio tradizionale su Autodesk Revit. Nei prossimi capitoli si chiarirà perché ci si è concentrati su questo elemento, in relazione all'utilizzo alternativo della modellazione visuale parametrica (VPL).

Anche in questo caso è stata creata una famiglia base, successivamente nidificata. Il primo passo ha riguardato la realizzazione di una specchiatura, utilizzando il comando *estrusione su percorso*: è stato quindi definito il profilo della specchiatura e il relativo percorso, ovvero la traiettoria lungo cui il profilo doveva scorrere per generare la geometria desiderata. Il primo ostacolo si è presentato già in questa fase: l'elemento della specchiatura è altamente articolato, e la sua profilazione richiedeva molto tempo. È importante sottolineare che, a meno di non ricorrere a un plug-in esterno come FARO As-Built, che consente di generare un'ortofoto della profilazione da importare direttamente nella famiglia, è necessario passare continuamente tra lo spazio di progetto e quello della famiglia. Nello spazio di progetto è infatti possibile visualizzare e lavorare sulla nuvola di punti, mentre nello spazio della famiglia è necessario ricreare le geometrie facendo riferimento a una

griglia guida, costruita sulla base delle misure rilevate nella nuvola di punti presente nel progetto, poiché all'interno dell'ambiente famiglia non è possibile visualizzare la nuvola stessa. Questo metodo risulta molto dispendioso in termini di tempo e, soprattutto, soggetto a numerosi errori ripetitivi, dovuti alla complessità del passaggio e alla mancanza di riferimenti diretti.



Figura 27 (a) sezione di una specchiatura del soffitto cassettonato, l'elaborazione mostra il confronto tra la profilazione rigida di *Autodesk Revit* e la nuvola di punti, evidenziandone le discrepanze.; (b) rappresentazione tridimensionale finale del soggetto, ottenuta tramite modellazione tradizionale con profilo su percorso.

Bisogna anche notare che, essendo il rilievo stato eseguito in tempi recenti, le deformazioni accumulate nel tempo risultano particolarmente evidenti, soprattutto nel soffitto. Questo ci permette di osservare come la modellazione "pulita" e rigida, tipica dell'approccio tradizionale, si discosti dalla complessità e dall'irregolarità della realtà. Il soffitto presenta infatti una marcata concavità verso il centro. Va quindi considerato, anche da un punto di vista deontologico, se sia più corretto semplificare il modello ed evidenziare, per esempio, solo il cedimento principale, oppure riprodurre fedelmente tale deformazione nella modellazione. Come già accennato in precedenza, questa decisione dipende strettamente dall'obiettivo del modello. Se ci si riferisce a un *Twin Modeling*, ad esempio, questa deformazione andrebbe probabilmente rappresentata in modo esplicito. Se invece si trattasse di un modello destinato alla manutenzione o alla sola documentazione informativa, potrebbe non essere necessario. Questa scelta va sempre definita a priori, soprattutto in un contesto operativo come quello attuale, dove è richiesta un'estrema rapidità esecutiva. Il processo HBIM, in questo senso, consente di impostare un flusso di lavoro strutturato, in cui tutte queste scelte vengono prese in partenza, con piena consapevolezza rispetto agli obiettivi del progetto e a ciò che effettivamente si intende modellare.

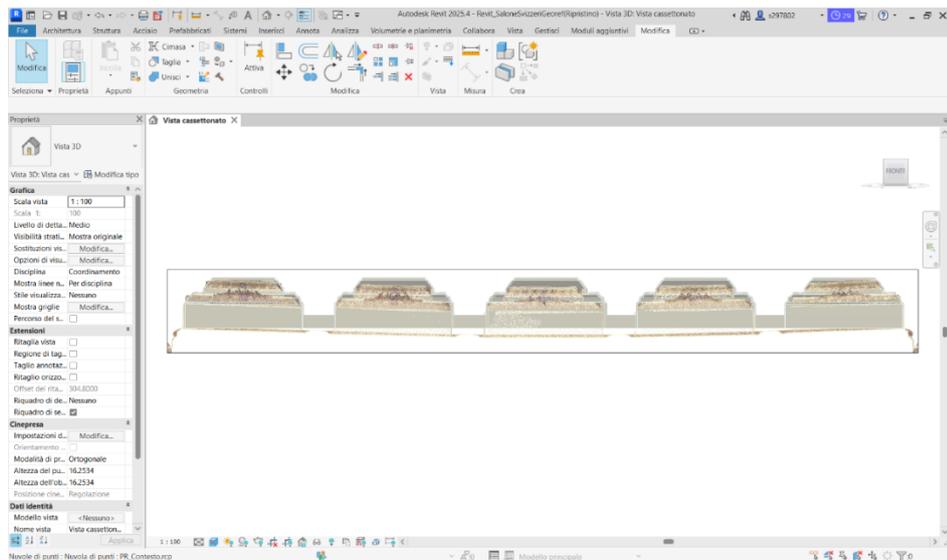


Figura 28 Sezione del soffitto cassettonato con sovrapposizione della nuvola di punti. È evidente come, avendo duplicato un unico modello di specchiatura per tutto il soffitto, il discostamento rispetto alla nuvola, dovuto alle deformazioni reali, risulti significativo.

La struttura gerarchica della modellazione tradizionale del cassettonato è costituita da una famiglia generica base, all'interno della quale sono state caricate due famiglie: una relativa alla specchiatura piccola, successivamente copiata in numero pari alle specchiature presenti, e una seconda, relativa alla specchiatura centrale di dimensioni maggiori. Quest'ultima è stata sviluppata con lo stesso metodo della specchiatura piccola. All'interno della famiglia base è stata inoltre inserita una griglia di riferimento per il posizionamento di ogni elemento.

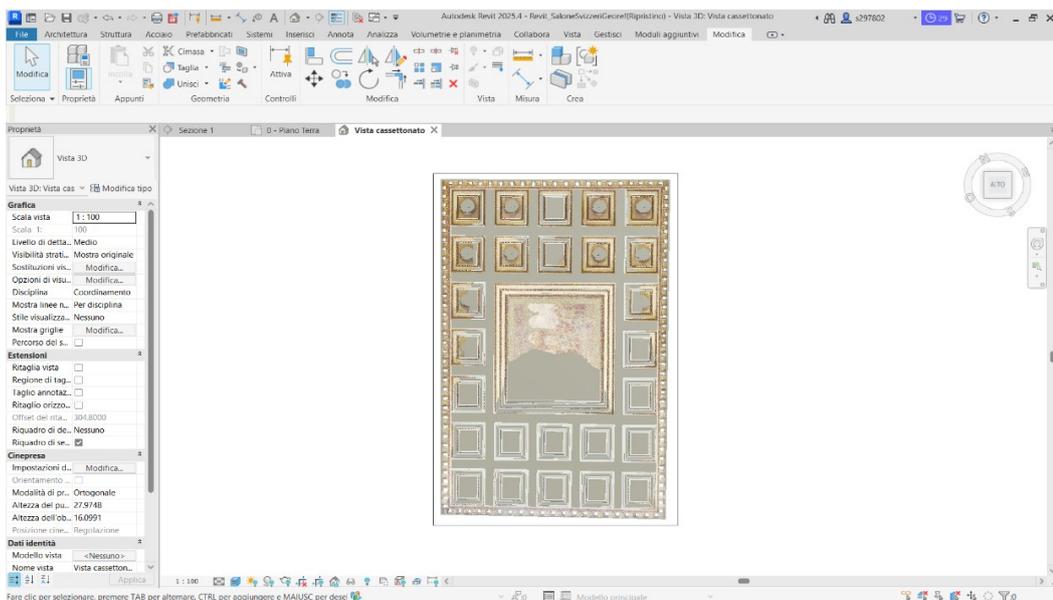


Figura 29 Modello rappresentante il soffitto cassettonato e sovrapposizione con nuvola di punto.

Più nello specifico, ogni specchiatura piccola è stata posizionata e ruotata manualmente, cercando di mantenere la massima precisione possibile. Il fatto che le specchiature non risultino perfettamente allineate tra loro è da attribuire al cedimento strutturale del soffitto avvenuto nel tempo, che ha compromesso la linearità originaria della composizione, adattandola progressivamente alle deformazioni.

I due elementi analizzati, il blocco murario e il soffitto cassettonato, hanno presentato entrambi difficoltà in fase di modellazione tradizionale, si tratta però di criticità fondamentalmente diverse. Nel primo caso, la complessità non era tanto legata alla geometria in sé, quanto alla sua gestione all'interno dell'ambiente di Autodesk Revit: il celino, pur avendo una forma abbastanza semplice, ha richiesto una modellazione molto accurata e frammentata, con numerosi vuoti, inclinazioni e un controllo costante di pianta e sezione contemporaneamente. Questa soluzione, pur molto macchinosa, è rientrata nei limiti della modellazione tradizionale. Al contrario per il soffitto cassettonato, il problema è risultato più strutturale che operativo. Le irregolarità e le asimmetrie degli elementi, e la progressiva deformazione del sistema dovuta al tempo e agli assestamenti storici, pongono interrogativi più profondi sulla validità del metodo stesso. La difficoltà non è solo come modellare ma anche sino a che punto forzare un sistema rigido come Autodesk Revit per adattarsi alla deformità. Da questo interrogativo nasce l'esigenza di sperimentare un metodo alternativo, più flessibile, capace di adattare gli elementi alla complessità degli edifici storici complessi. Una possibile risposta è stata quella della modellazione diretta sulla nuvola di punti attraverso il Visual Programming Language (VPL).

Sono state utilizzate tutte le risorse a disposizione per ottenere una modellazione tradizionale che rispettasse il più possibile la geometria originale. Di seguito si riportano due immagini: la prima mostra il modello finale, la seconda evidenzia la sovrapposizione tra il modello e la nuvola di punti reality-based, utile per verificare il livello di corrispondenza e coerenza geometrica raggiunto durante il processo.

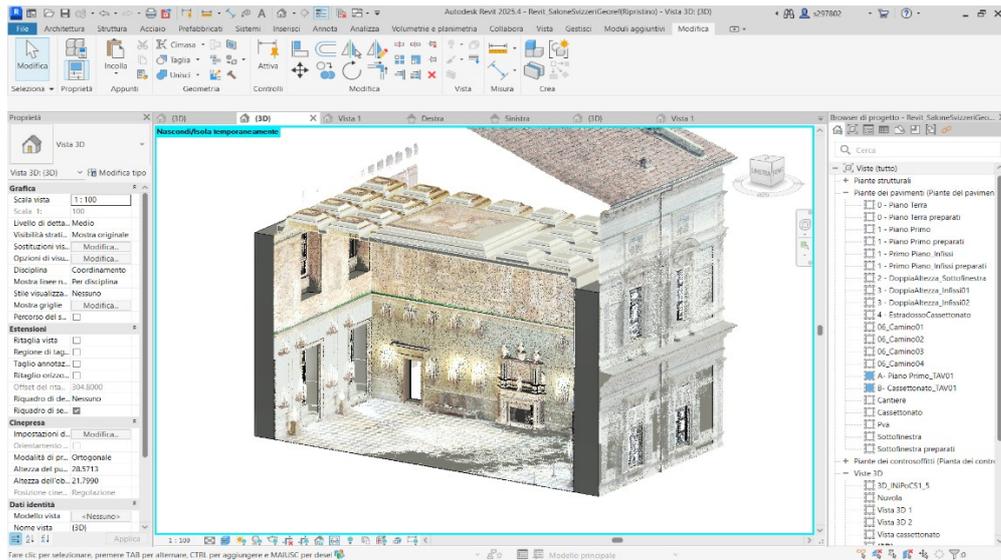


Figura 30 l'immagine rappresenta la sala delle guardie svizzere in modellazione tradizionale e la sovrapposizione della nuvola di punti

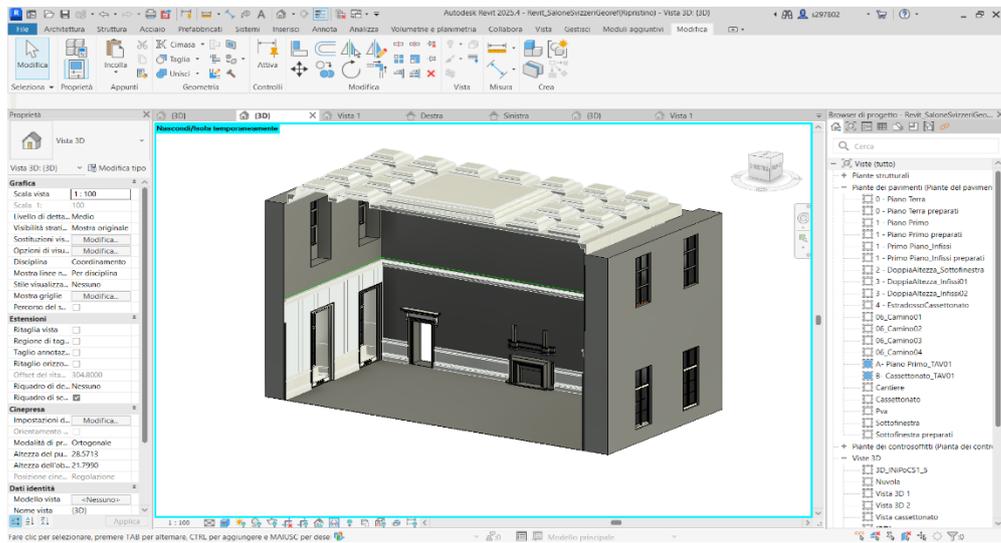
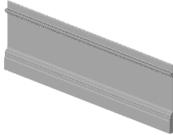
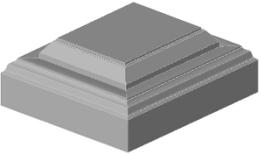
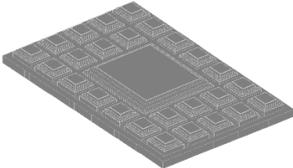


Figura 31 l'immagine rappresenta la sala delle guardie svizzere in modellazione tradizionale e la sovrapposizione della nuvola di punti

Tabella di confronto delle diverse modellazioni

Elemento Architettonico	Riferimento grafico	Fam. Nidificata/Semplice	Criticità Principali	Osservazioni
Setti Murari		Tool default Muro di Autodesk Revit	Andamento non rettilineo dei setti murari	Discriminante per la scelta della modellazione degli elementi finestrati e le sue bucatore
Zoccolatura		Famiglia modello generico metrico inserita successivamente nel progetto	Nessuno	Si è rivelato necessario la creazione di una famiglia così da poter inserire i parametri condivisi
Blocco murario finestrato		Famiglia nidificata: Modello generico basato su superficie, Modello generico basato su muro, Modello generico metrico.	Murature non rettilinee, inclinazioni variabili, celino complesso	Gestione migliorata con famiglie nidificate; richiede attenzione su orientamento e geometrie variabili
Coperture pareti, lastre di marmo		Famiglia generica metrica	Nessuno	Elemento creato in seguito per caratterizzare con dettagli il modello
Specchiatura Media del soffitto cassettonato		Famiglia generica metrica su profilazione della nuvola di punti	Profilazione manuale complessa e lenta, rischio di errori	Modello poco flessibile rispetto a deformazioni reali; limite operativo evidente
Struttura completa del cassettonato		Famiglia nidificata, implementazione di griglia di sostegno per la costruzione	Necessaria valutazione obiettivi modellazione; sperimentazione VPL	Necessaria valutazione obiettivi modellazione; sperimentazione VPL c

- ***Estrazione Finale degli elaborati 2D***

Una volta completata la modellazione dell'intera Sala delle Guardie Svizzere, si è proceduto all'estrazione degli elaborati 2D. Sono state generate piante e sezioni mediante l'esportazione diretta dal modello.

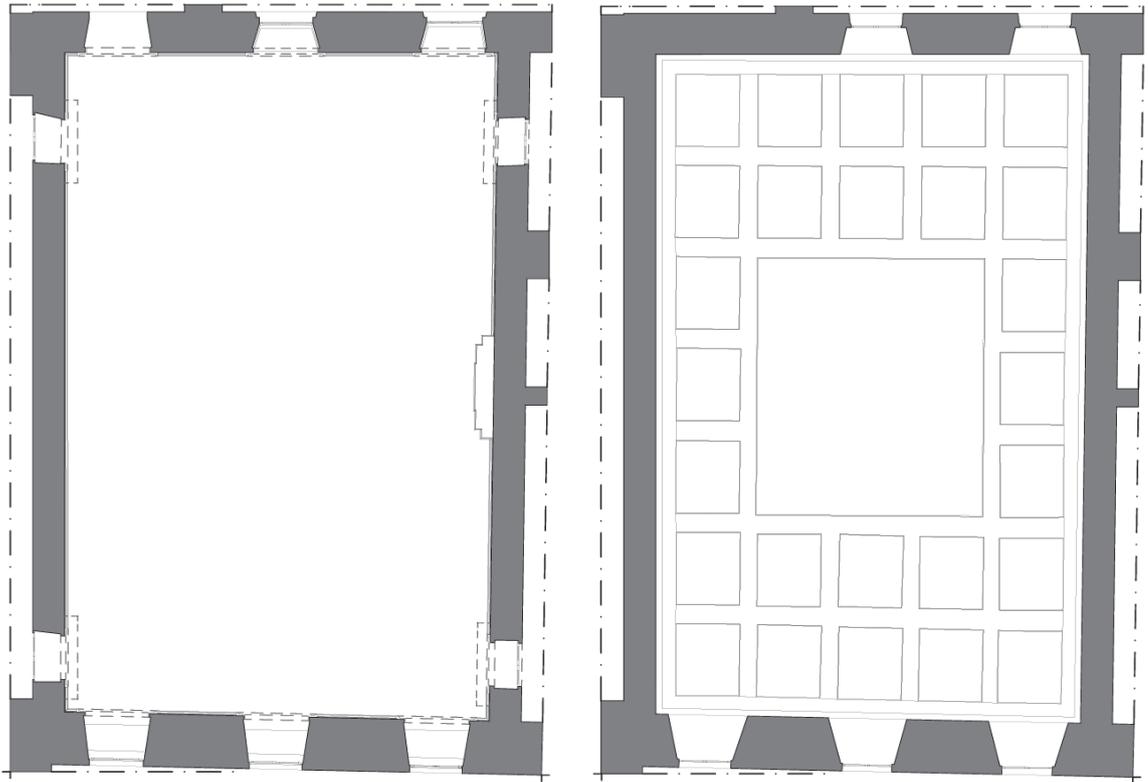


Figura 32 L'immagine rappresenta il risultato dei due elaborati 2D, a sinistra la pianta e a destra la pianta che rappresenta la doppia altezza. Elaborazione grafica dell'autrice della ricerca. Fuori scala

L'esportazione ha permesso di importare gli elaborati su AutoCAD, così da completare la sezione nella parte sottostante, corrispondente al chiostro, e nella parte superiore relativa al sottotetto, fondamentali per la completezza della restituzione. Attraverso l'elaborazione dei dati lidar, su *PointCab* e l'inserimento a supporto in Autodesk Autocad.

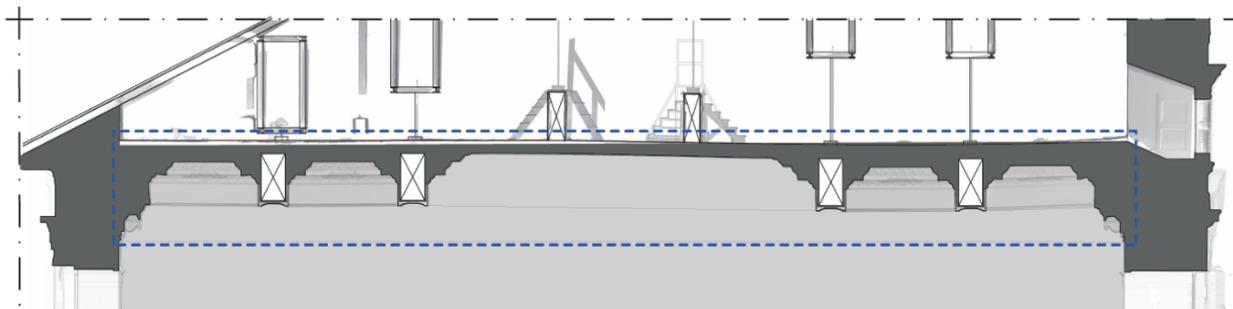


Figura 33 Estratto della sezione, rappresenta la porzione in cui il soffitto cassettonato ligneo si ancora al sottotetto. Elaborazione grafica dell'autrice della ricerca. Fuori scala.

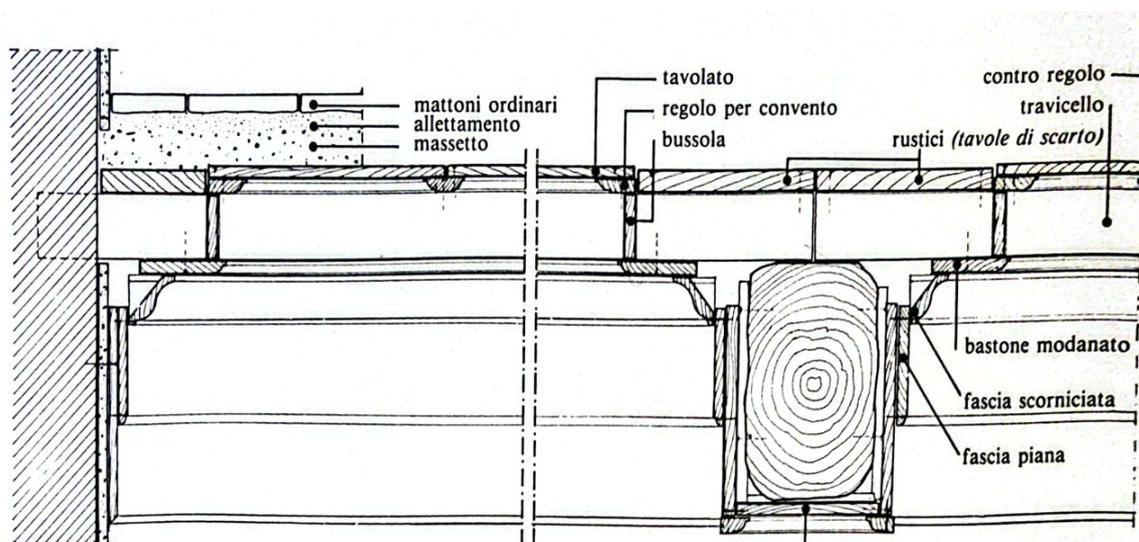


Figura 38 Particolare estratto dal Manuale del Recupero del comune di Roma, Tipografia del Genio Civile, 1995. Sezione strutturale.

Il sottotetto è stato oggetto di studio specifico per comprenderne il funzionamento strutturale. Attraverso l'analisi di alcuni documenti, è stato possibile ipotizzare il sistema di connessione tra il soffitto cassettonato e la parte superiore, risultato piuttosto complesso poiché nel sottotetto coesistono sia la struttura originaria sia quella successivamente integrata.

5. Modellazione VPL

Il Visual Programming Language (VPL) rappresenta una risorsa dalle grandi potenzialità, in grado di implementare in modo significativo i modelli BIM in termini di progettazione, modellazione e gestione dei parametri. Questo tipo di strumento è stato introdotto

è la possibilità di semplificare l'interazione con modelli complessi, consentendo la manipolazione dei dati in tempo reale attraverso un'interfaccia visuale. Questo tipo di approccio non solo facilita la gestione dei parametri che costituiscono, ad esempio, un modello BIM o HBIM, ma consente anche di esplorare soluzioni progettuali in modo più dinamico e immediato grazie alla possibilità di vedere in tempo reale l'impatto delle modifiche apportate al disegno. La progettazione parametrica, infatti, che è alla base della VPL, offre un livello di flessibilità superiore rispetto ai metodi tradizionali, poiché permette di collegare variabili e parametri in modo tale che al cambiare di uno, anche gli altri si adattino automaticamente, ottimizzando il processo progettuale.

Ciononostante, l'utilizzo della VPL può mostrarsi inadatto a seconda degli obiettivi che un eventuale progetto si prepone. Gli strumenti che utilizzano il linguaggio di programmazione visuale cooperano con applicazioni BIM e sono integrati negli stessi programmi. Dynamo, ad esempio, è progettato per automatizzare operazioni ripetitive, gestire dati complessi e creare geometrie parametriche in Autodesk Revit; le componenti attraverso cui opera sono: nodi, connessioni, input e output ed esecuzione del flusso.

Un nodo in Dynamo rappresenta un'azione, istruzione o operazione specifica, come la creazione di un elemento geometrico oppure di un calcolo matematico, ed è rappresentato da un rettangolo (o blocco) che ne contiene il nome. In ognuno di questi elementi sono facilmente riconoscibili le porte di Input e Output, rispettivamente a sinistra e a destra del blocco, che vengono utilizzati per inserire dati e ricevere il risultato delle elaborazioni richieste. I nodi sono inter-collegati tramite i "fili", curve di connessione che rappresentano il flusso di dati tra un'operazione e l'altra: quando in un blocco si ottiene un output, questo diventa, tramite queste connessioni, l'input del rettangolo successivo.

Dynamo, seguendo la struttura grafica di un diagramma di flusso, calcola in modo lineare da destra verso sinistra i dati, restituendo visivamente i percorsi di ingresso e di uscita delle informazioni di partenza.

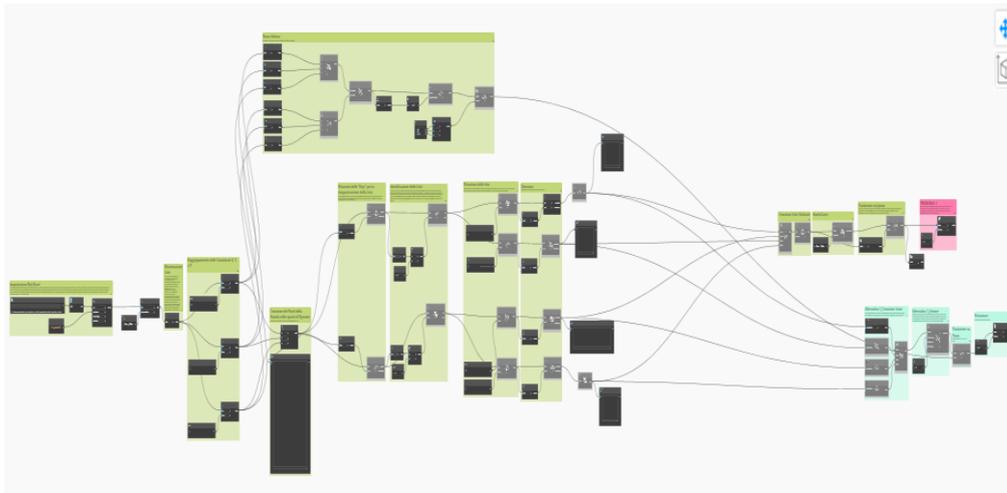


Figura 35 Rappresenta un flusso di lavoro generico sviluppato su Dynamo Autodesk e si può comprendere come a livello grafico possa essere chiaro, permettendo l'inserimento di gruppi per la suddivisione di fasi diverse dello sviluppo del Workflow.

Utilizzando Dynamo è possibile sviluppare e testare diverse soluzioni progettuali sfruttando la sua interfaccia grafica per definire interazioni tra gli elementi del modello e ottimizzare i parametri in tempo reale. L'approccio offerto dal programma consente di lavorare a un livello estremamente preciso, tale per cui anche modifiche modeste nei parametri avranno un impatto significativo sul modello complessivo.

Un ulteriore vantaggio che comporta è la possibilità di adattare i modelli in modo estremamente flessibile a seconda delle esigenze specifiche del progetto, monitorando ogni cambiamento, geometrico o parametrico, e implementandolo direttamente all'interno del modello, ottenendo una dimostrazione immediata degli effetti di questo sul progetto. Grazie a questo, Dynamo, non solo semplifica la gestione di progetti complessi, ma introduce una dimensione di interattività, fondamentale nell'ambito dell'architettura e della conservazione del patrimonio.

5.1 Domanda di modellazione

Il punto di partenza di questa ricerca è stato proprio il porsi una domanda molto concreta e pratica: esiste un modo per affrontare la modellazione degli elementi complessi del patrimonio storico che sia meno vincolato dalle logiche preimpostate degli algoritmi di modellazione-base implementati nei software parametrici, più aderente alla realtà costruttiva e geometrica degli edifici storici, e che riduca al minimo gli errori e le ripetizioni generate da schematizzazioni forzate? Nella modellazione tradizionale ci si scontra spesso con limiti evidenti, legati sia agli strumenti che ai tempi di lavorazione, soprattutto quando si tratta di apparati architettonici irregolari o deformati, come è emerso chiaramente nel caso della Sala delle Guardie Svizzere. L'utilizzo della modellazione VPL nasce proprio come tentativo di rispondere a questa esigenza.

All'interno della modellazione visuale bisogna ragionare fin da subito con una logica a catena, dove ogni nodo fa parte di un percorso più ampio e serve a costruire gradualmente la funzione finale. Non si tratta quasi mai di comandi isolati che portano subito al risultato, ma piuttosto di combinazioni di nodi che, messi insieme nel modo corretto, permettono di ottenere quello che ci serve. Un esempio chiaro si può vedere nel secondo test: il nodo *List.FilterByBoolMask* serve a filtrare una lista secondo un criterio, ma quel criterio — la cosiddetta “maschera” — non esiste da solo, va costruita. Per farlo bisogna impostare prima tutta una serie di passaggi, creando una discriminante che permette di dividere i dati in base alle condizioni che abbiamo deciso.

Questo meccanismo fa capire che dietro a ogni passaggio apparentemente semplice c'è una struttura che va pensata a monte. Si può parlare, in un certo senso, di “traduzione istantanea”, ma solo se prima abbiamo creato il contesto logico che permette a ogni nodo di funzionare. È proprio questa la particolarità della VPL: richiede una fase iniziale dove bisogna ragionare e scomporre il problema in piccole operazioni, che poi insieme portano al risultato, evitando soluzioni preconfezionate e rendendo il metodo più flessibile e adatto anche alle geometrie complesse, come quelle che si trovano nel patrimonio storico.

- **Test eseguiti**

Nei paragrafi seguenti vengono presentati i test eseguiti, partendo dalla definizione del metodo utilizzato per la scelta degli elementi.

- **Test1: teorico**

Si utilizza una figura bidimensionale, quindi, dimostrando la regola e successivamente impiegata come fondamento per tutti gli altri casi, con l'obiettivo di verificarne la replicabilità.

- **Test 2: Nuvola Sintetica**

Il test, che può essere considerato quasi un'estensione del primo, è stato introdotto per verificare l'efficacia della metodologia anche rispetto alla terza coordinata, la Z, fondamentale per passare a una dimensione tridimensionale.

- **Test 3: Elemento architettonico semplice, il pilastro**

Questo è stato il primo test su una nuvola di punti basata su dati *reality-based*. L'obiettivo era verificare la procedura di modellazione VPL su un elemento semplice dell'architettura, isolando e ricostruendo un pilastro attraverso la metodologia sperimentata nei test precedenti basati su dati sintetici. I risultati sono stati positivi, confermando la possibilità di modellare correttamente la porzione di pilastro selezionata.

- **Test 4: Elemento architettonico complesso, il soffitto cassettonati**

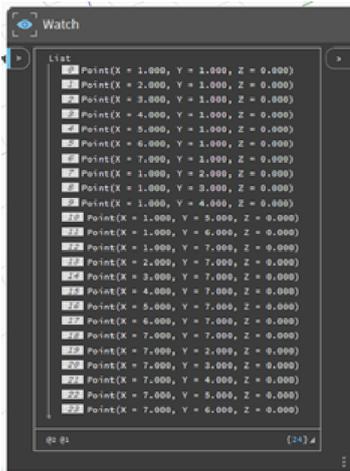
La metodologia è stata sperimentata su un elemento più complesso e irregolare, la specchiatura, che ha confermato la validità della regola anche su forme articolate. In questo caso, sono emerse alcune sfide, come la gestione degli angoli generati dalla specchiatura, ma grazie a un approccio metodico è stato possibile individuare una soluzione efficace e portare a termine la modellazione.

5.1.1 Test 1: teorico

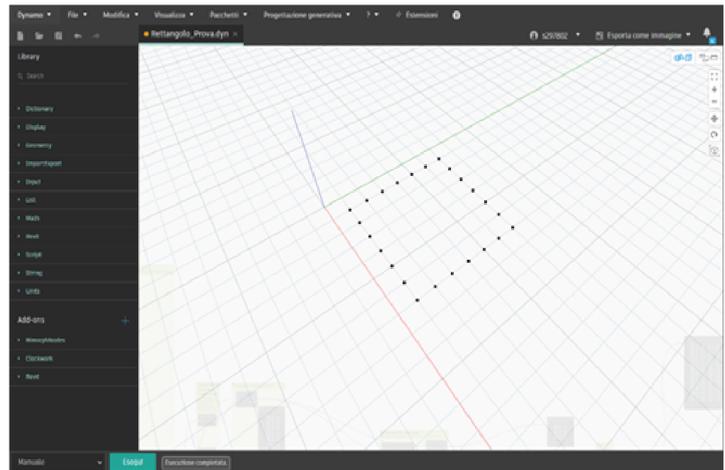
Prima di affrontare direttamente la modellazione delle specchiature del cassettonato del Salone degli Svizzeri, è stato necessario compiere un passo indietro e riflettere sui presupposti logici e geometrici che sarebbero poi diventati centrali nella fase operativa. La complessità geometrica degli elementi reali e l'assenza di ortogonalità evidente in alcune

porzioni avevano infatti generato, nelle prime fasi di approccio a Dynamo, un certo disorientamento metodologico.

Per questo motivo si è scelto di impostare un test preliminare basato su una configurazione estremamente semplificata, con l'obiettivo di chiarire il funzionamento dei nodi fondamentali di clusterizzazione e ordinamento, e al contempo comprendere meglio il rapporto tra geometria spaziale e gestione delle coordinate.



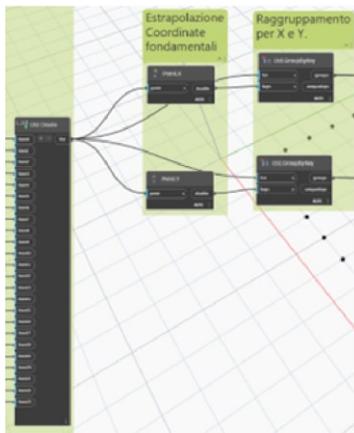
(a)



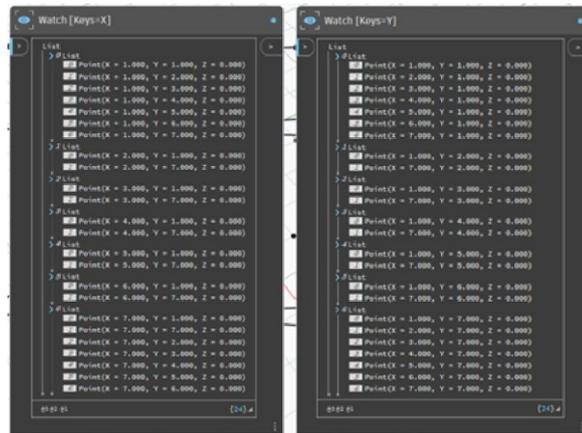
(b)

Figura 36 (a) Nell'immagine è riportato l'elenco dei punti (X, Y, Z) utilizzati per verificare la teoria e generare gli elementi geometrici di base del test; (b) si osserva la visualizzazione spaziale dei punti generati, corrispondenti a quelli elencati nella figura a destra. Dati e immagini estratti dalle elaborazioni all'interno del *plug-in* *Dynamo*.

Il test è consistito nella creazione di un quadrato definito da punti sul piano XY, una figura ortogonale elementare ma utile a isolare i principi base. Questo ha permesso di osservare come nei lati orizzontali i punti presentassero una Y costante, mentre nei lati verticali fosse costante la X. È emersa così una regola intuitiva ma fondamentale: la stabilità di una coordinata è direttamente legata alla direzione dell'elemento. Partendo da questa consapevolezza, si è sperimentato l'utilizzo del nodo `List.GroupByKey` con chiavi Y e X per suddividere automaticamente i lati del quadrato. In questo modo si è ottenuta una distinzione ordinata tra i lati orizzontali e verticali, ciascuno collocato in una lista separata e pronto per l'interpolazione.



(a)



(b)

Figura 37 (a) la prima figura a sinistra rappresenta il workflow rappresentato mostra il concetto di clusterizzazione attraverso discriminanti che permettono di ottenere gruppi di liste corrispondenti ai lati verticali e orizzontali; (b) In figura si notano i dati numerici che generano quattro liste, ciascuna corrispondente a uno dei quattro lati.

Sebbene estremamente semplice, questo test si è rivelato decisivo: ha permesso di trasformare un'intuizione geometrica in una procedura concreta, e ha fatto emergere il valore dell'ortogonalità come chiave di accesso alla gestione ordinata dei punti. Questa comprensione si è poi rivelata essenziale nel momento in cui si è affrontata la modellazione delle specchiature reali del cassettonato. In quel contesto, la necessità di isolare porzioni geometriche coerenti, individuare criteri di ordinamento, e creare profili precisi, ha trovato le sue fondamenta concettuali proprio in questo test. Inoltre, l'impostazione ortogonale adottata nel corso della sperimentazione sui cassettoni è stata in parte una scelta strategica, derivata direttamente dalle lezioni apprese in questa prima fase esplorativa.

5.1.2 Test 2: Nuvola sintetica

Per avvalorare il test bidimensionale sopra descritto, si è deciso di eseguire un medesimo test ma tridimensionale, utilizzando una nuvola sintetica creata tra AutoCAD e CloudCompare, da importare nello spazio di lavoro di Dynamo per provare a realizzare la modellazione finale dell'elemento.

Il processo è iniziato in AutoCAD, disegnando un semplice parallelepipedo nello spazio 3D. L'obiettivo, come nel test precedente, era quello di verificare la possibilità di modellare in Dynamo a partire da una nuvola di punti. Per ottenere tale nuvola, l'oggetto disegnato è stato esportato in formato **.stl**, rendendolo leggibile da CloudCompare. Da qui, tramite un comando disponibile nel menu, è stato possibile convertire la mesh in una nuvola di punti sintetica.

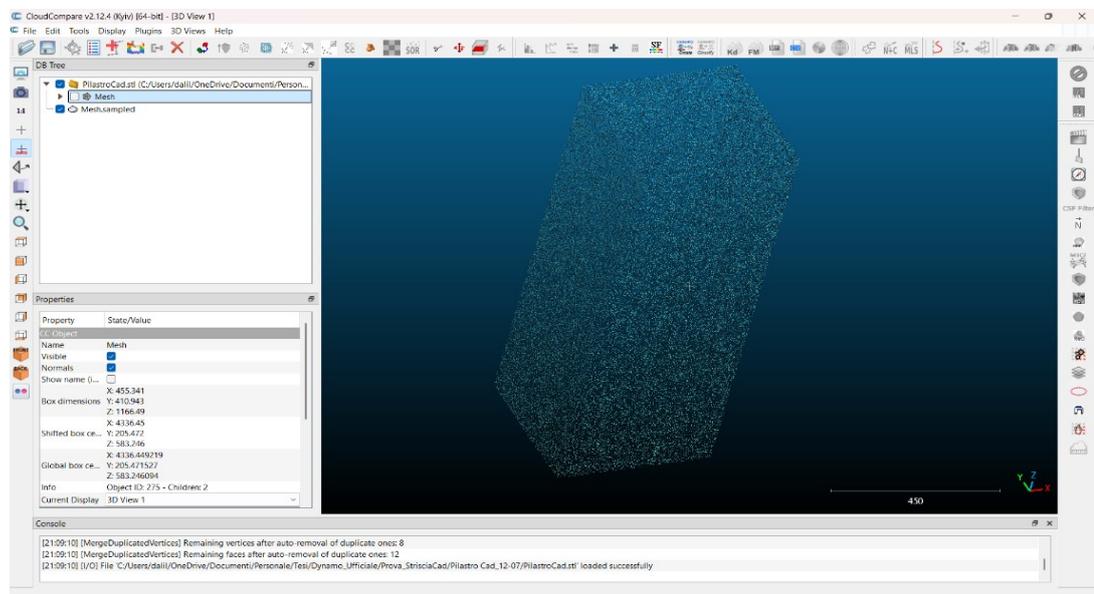


Figura 38 Rappresentazione della Nuvola sintetica creata attraverso la mesh esportata da Autodesk Autocad.

Una volta generata la nuvola, si è proceduto con l'esportazione in formato ASCII cloud, propedeutico all'importazione in Dynamo. Per garantire la corretta interpretazione dei dati, è stato necessario un passaggio intermedio in Excel, utile a riformattare correttamente le coordinate.

Nel processo di importazione guidata del file **.txt**, è fondamentale impostare la modalità di lettura su "larghezza fissa", poiché le coordinate sono rappresentate da numeri decimali separati da spazi. Questa scelta evita conflitti che deriverebbero dall'uso di delimitatori

(come virgole o tabulazioni), potenzialmente già presenti nei dati iniziali. Inoltre, è essenziale configurare il punto come separatore decimale e la virgola per le migliaia, in modo da allineare la formattazione al sistema di lettura di Dynamo.

A questo punto il file può essere salvato in formato .xlsx e reso pronto per essere caricato nel flusso di lavoro parametrico. Queste operazioni, pur apparentemente semplici, sono determinanti per garantire il corretto scambio di dati tra i diversi software e per assicurare la riuscita della modellazione all'interno di Dynamo.

Passando al vero e proprio test, si introducono i passaggi dell'importazione e quindi il passaggio tra dati Excel e dati leggibili da Dynamo. Si tratta di un passaggio fondamentale per la visualizzazione dei punti e quindi per la riuscita della modellazione.

L'importazione si compone di tre fasi principali, indispensabili per una lettura chiara e corretta dei dati:

- la composizione dei nodi di lettura;
- la pulizia da valori nulli;
- la trasposizione (cioè, lo scambio righe-colonne).

Con la prima operazione, si crea un collegamento tra il file Excel salvato in un percorso specifico del computer e lo spazio di lavoro di Dynamo. In seguito, è necessario verificare ed eliminare eventuali dati nulli o vuoti che comprometterebbero l'importazione. Successivamente si passa alla trasposizione, in quanto la combinazione di nodi utilizzata per il collegamento organizza i dati in liste separate per ciascun punto. Ogni lista contiene tre elementi, indicizzati da 0 a 2, che rappresentano le coordinate cartesiane X, Y e Z. Con l'uso del nodo apposito si riorganizzano i dati in una struttura composta da tre sotto-liste: una per tutte le X, una per tutte le Y e una per tutte le Z. Il risultato finale è quindi una lista contenente tre elenchi distinti, ognuno dei quali raccoglie tutte le coordinate distintamente di X, Y e Z.

A seguito di questi passaggi si procede con la visualizzazione dei punti nello spazio di disegno di Dynamo. Per farlo, si divide la lista principale nelle tre sotto-liste X, Y e Z, attraverso una combinazione di due nodi. Il nodo principale consente di restituire un elemento da un

elenco, specificando un indice attraverso il secondo nodo: in questo caso 0 per le X, 1 per le Y e 2 per le Z. Così facendo si ottengono le tre coordinate fondamentali pronte per la costruzione dei punti. Per la visualizzazione vera e propria si utilizza il nodo base di Dynamo *Point.ByCoordinates* e, a quel punto, la nuvola di punti viene restituita visivamente.

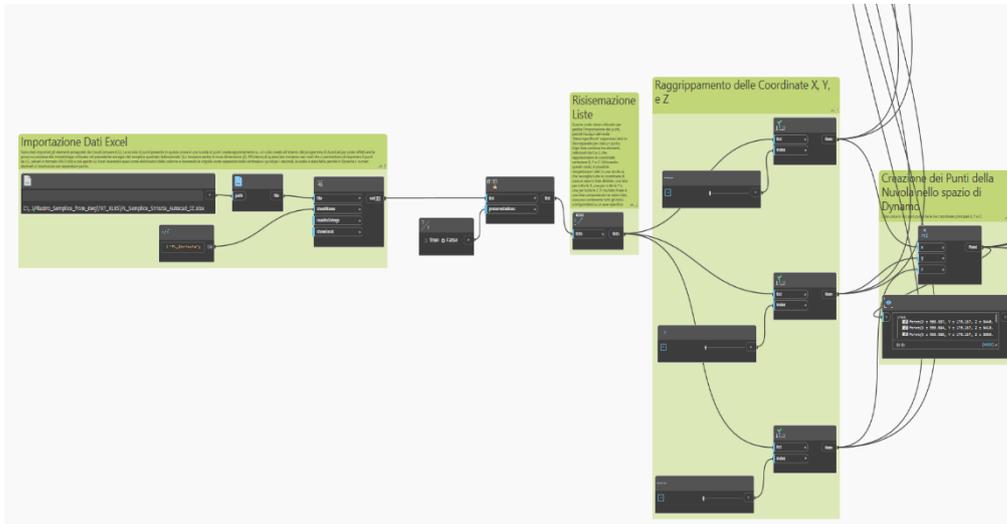


Figura 39 Rappresentazione di parte del workflow Dynamo, si identificano i gruppi di combinazione di nodi utili all'importazione e Visualizzazione della nuvola.

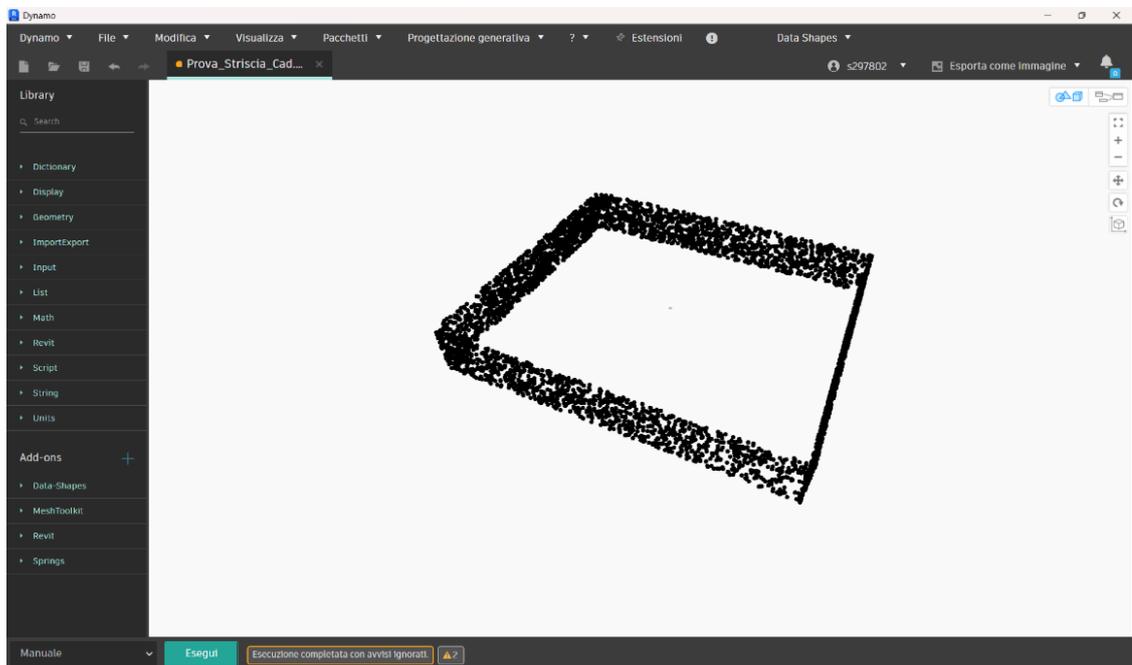


Figura 40 Rappresentazione visiva nello spazio di disegno di Dynamo, ottenuta a seguito delle operazioni computazionali mostrate nell'immagine precedente.

A questo punto si va ad applicare il principio già sperimentato nel primo test preliminare: si vogliono ottenere i quattro lati distinti (escludendo le due basi) del parallelepipedo in maniera semiautomatica. Per farlo, si utilizzerà la stessa logica già espressa nel test bidimensionale. Si procede quindi con il raggruppamento dei punti per coordinate X e per coordinate Y, ottenendo due raggruppamenti differenti, rispettivamente utili per individuare i lati orizzontali e quelli verticali.

Tuttavia, qui si presenta un ostacolo: nel test precedente si erano creati manualmente solo 25 punti, e quindi era sufficiente aprire un "Watch" per verificarne gli indici e capire rapidamente a quali lati corrispondessero. In questo test, invece, il numero di punti è molto più elevato e risulta impensabile scorrere le liste manualmente. Serviva quindi una soluzione automatica per identificare, senza ambiguità, le due liste contenenti i lati di interesse.

La soluzione individuata consiste nell'utilizzare una combinazione di nodi specifici che restituisca in automatico l'indice delle due liste che ci interessano. Questa combinazione viene applicata due volte: una per la lista raggruppata per X e una per quella raggruppata per Y. Il funzionamento è costruito in modo gerarchico: il nodo finale, che restituisce le liste desiderate, riceve in ingresso una struttura di nodi che costituisce una "maschera logica", cioè una sorta di domanda che interroga ogni lista contenuta all'interno del raggruppamento iniziale. La domanda in questione richiede di identificare quali liste contengano più di due elementi, così da isolare automaticamente i gruppi che corrispondono ai lati del parallelepipedo.

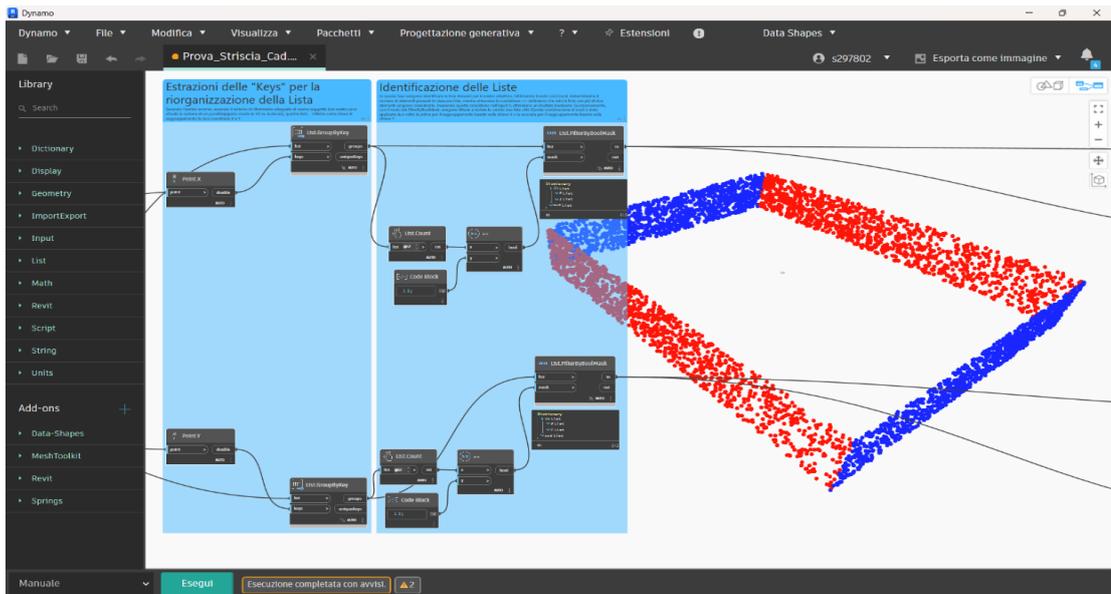


Figura 41 Schema del workflow in Dynamo che mostra la combinazione dei nodi utilizzati per ottenere in modo automatico due liste separate per ogni operazione di filtraggio. Come si osserva nello spazio grafico di Dynamo sullo sfondo, i lati verticali e orizzontali risultano evidenziati con colori distinti, corrispondenti a quanto rappresentato anche nella figura di riferimento.

Ottenute le liste relative a ciascun lato del parallelepipedo, l'ultimo passaggio, prima dell'estrusione del solido, consiste nella creazione delle linee che definiscono il perimetro da utilizzare per la generazione del volume.

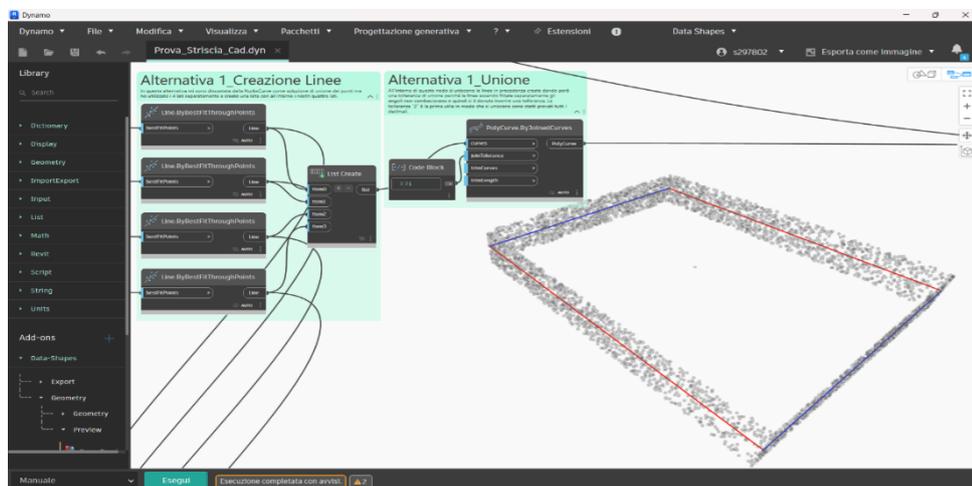


Figura 42 In questa immagine si osserva il workflow che ha permesso di ricavare le linee perimetrali a partire dalle porzioni di nuvola di punti. Ogni lato è stato ricostruito seguendo l'andamento reale dei dati, tramite un processo di interpolazione che calcola la miglior linea possibile in relazione ai punti esistenti, garantendo così coerenza geometrica rispetto al rilievo.

Per ottenere queste linee si procede semplicemente con un *Best Fit* applicato a ciascuna porzione di punti, riferita ai diversi lati del parallelepipedo precedentemente individuati. Una

volta generate le linee di contorno, è possibile applicare il comando di estrusione, ottenendo così il solido finale.

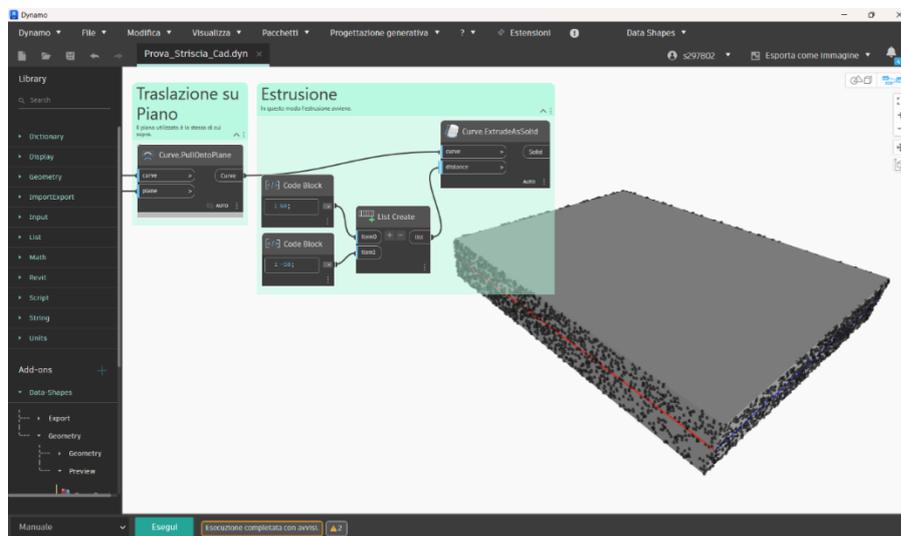


Figura 43 In questa immagine si osserva il workflow che consente di ottenere l'estrusione finale del solido, costruito in modo da rispettare le geometrie rilevate e aderire alla nuvola di punti sintetica elaborata.

5.1.3 Test 3: Elemento architettonico semplice, Il pilastro

Nel test precedente, l'elaborazione della modellazione è stata sviluppata attraverso la regola data inizialmente e sperimentata nel precedente test. Rispetto al test precedente, che è stato eseguito su una nuvola sintetica, quindi molto regolare, questo test verrà sviluppato attraverso una nuvola di punti ottenuto da un dato reality-based. La nuvola di punti è stata estratta dai rilievi di Palazzo Reale di Torino. Il pilastro è stato scelto come una figura geometrica semplice principale degli elementi base dell'architettura.

In un primo momento è stata estratta la porzione di nuvola di punti di interesse, isolando il pilastro scelto, e successivamente è stata eseguita la pulizia su *CloudCompare* (CC).

Come nel test precedente, le esportazioni da *CloudCompare* sono state effettuate in formato *Excel* e successivamente importate su *Dynamo*, utilizzando la combinazione di nodi già descritta.

Lo sviluppo della modellazione si è basato sulla creazione di profili necessari al successivo Loft. Procedendo per gradi, si è costruita la logica principale attraverso una serie di clusterizzazioni multiple e ripetibili, semplicemente variando le discriminanti in base al risultato e al tipo di raggruppamento da ottenere. Le clusterizzazioni generano le porzioni

su cui si interviene riordinando i punti e creando le *NurbsCurve*, che costituiscono concretamente i profili.

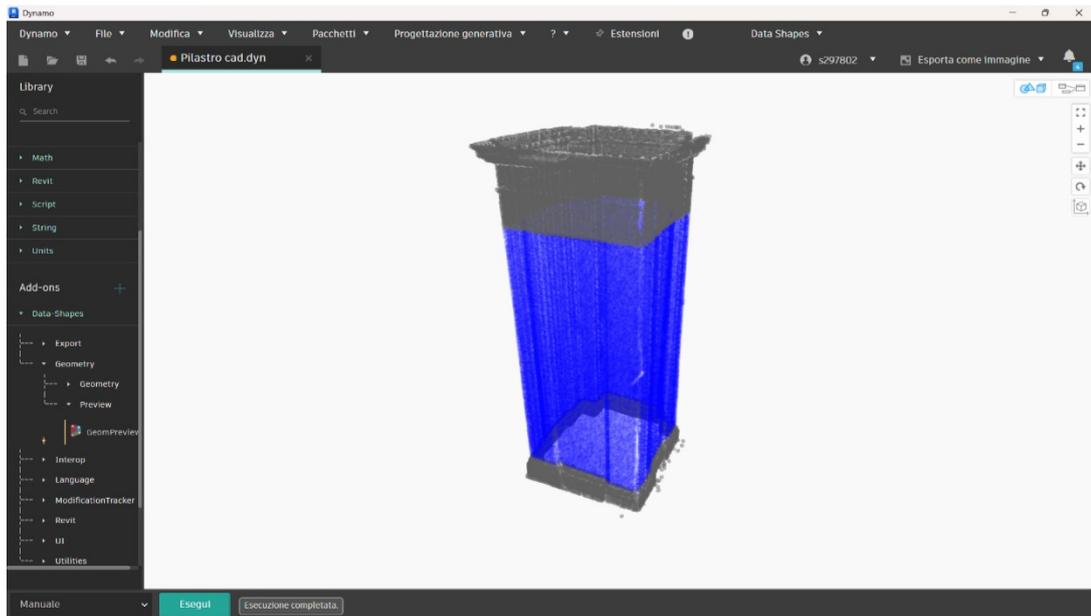


Figura 44 L'immagine rappresenta una porzione di nuvola di punti di colore blu che rappresenta la porzione di modellazione di pilastro oggetto della modellazione VPL.

Nell'immagine raffigurata si nota come viene evidenziata la porzione di nuvola scelta per la modellazione VPL. Questa decisione viene presa perché, in questa porzione, non sono presenti variabili di sezione lungo l'altezza. Le parti grigie andrebbero trattate con altre sezioni, seguendo però sempre la stessa regola.

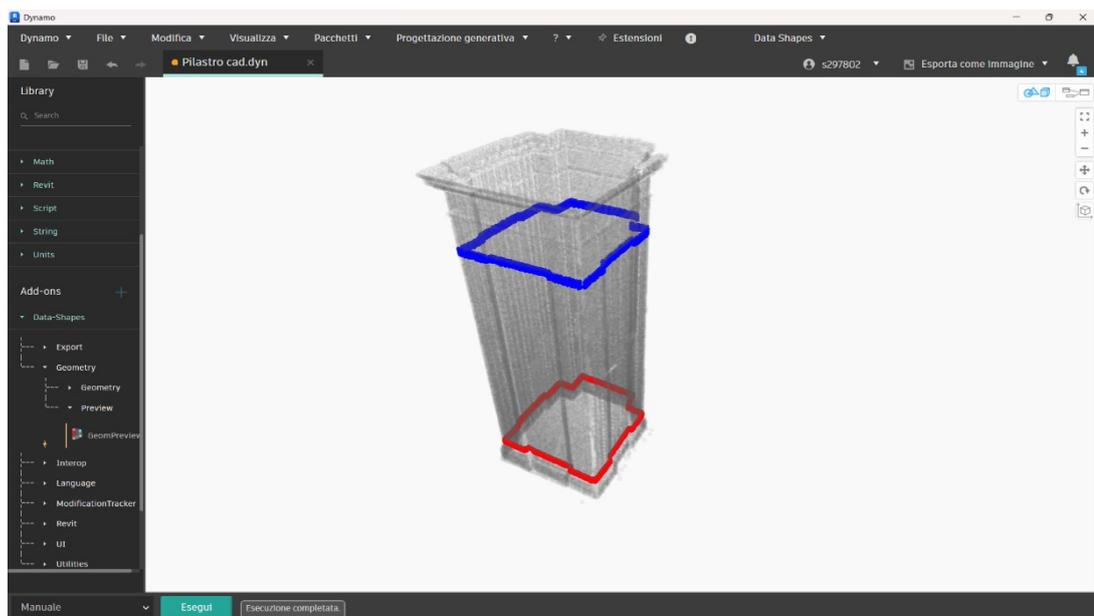


Figura 45 Sezioni di nuvola scelte per la creazione dei profili.

Attraverso una clusterizzazione scegliamo le sezioni di punti per lo sviluppo dei profili. Ogni porzione di punti viene analizzata e ulteriormente clusterizzata per ottenere porzioni ricomponibili e riordinate cosicché da ottenere profili geometrici continui.

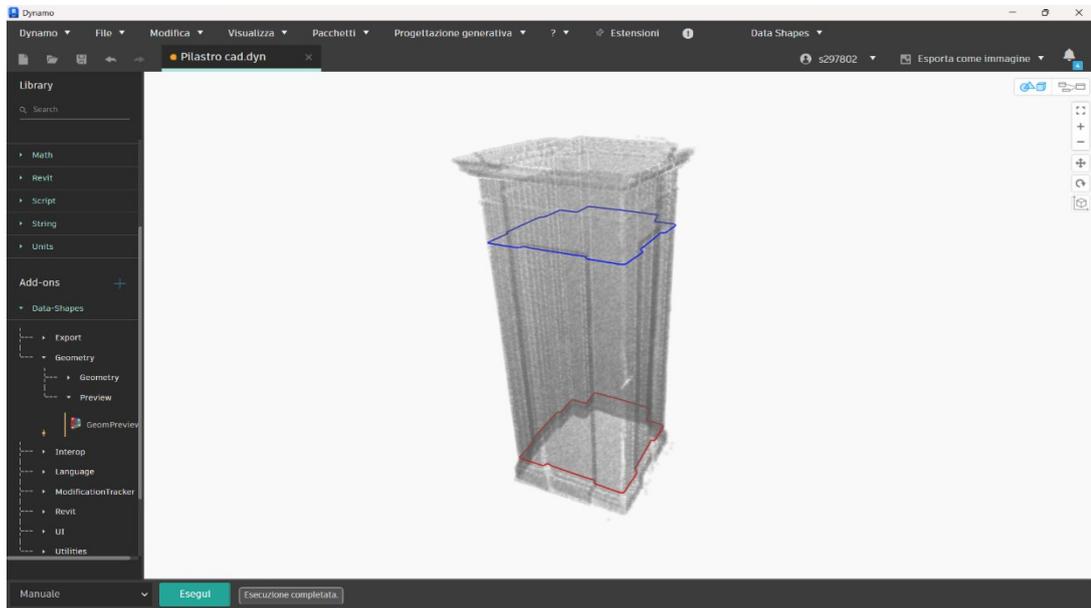


Figura 46 L'immagine presenta i profili ottenuti.

Attraverso i profili ottenuti sono stati quindi uniti attraverso il comando di “Loft” che permette di ottenere una superficie tramite l’unione di curve trasversali, come i profili ottenuti.

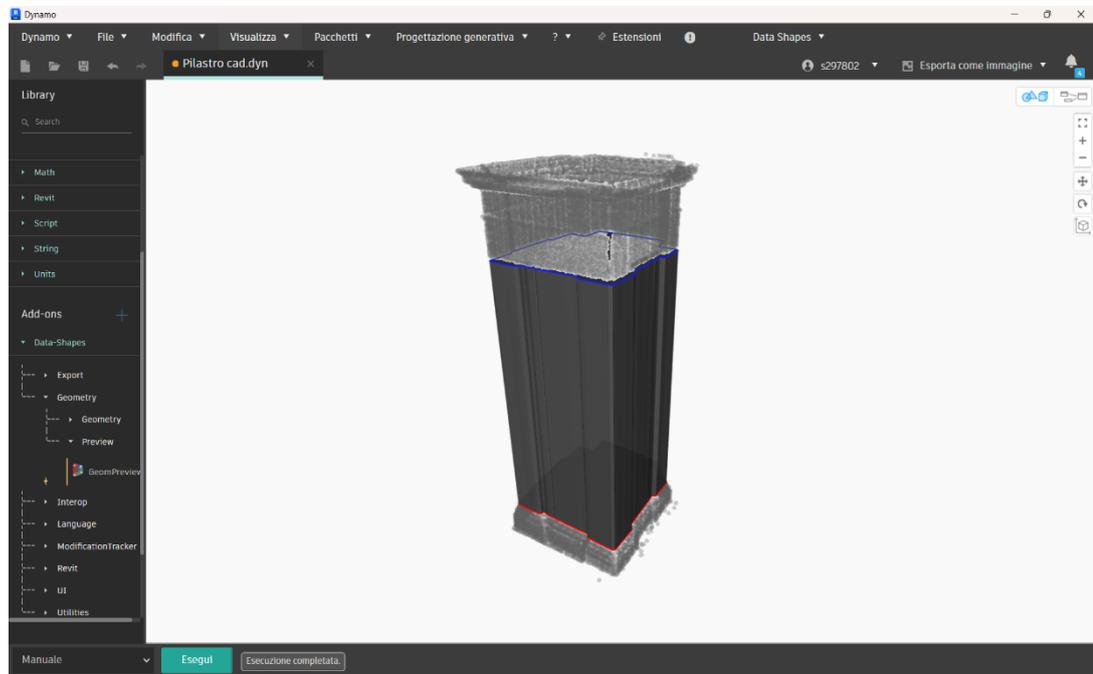


Figura 47 L’immagine rappresenta in grigio la superficie ottenuta che rappresenta il pilastro di partenza.

Nella figura sottostante è stato rappresentato il solido finale ottenuto dalla modellazione VPL.

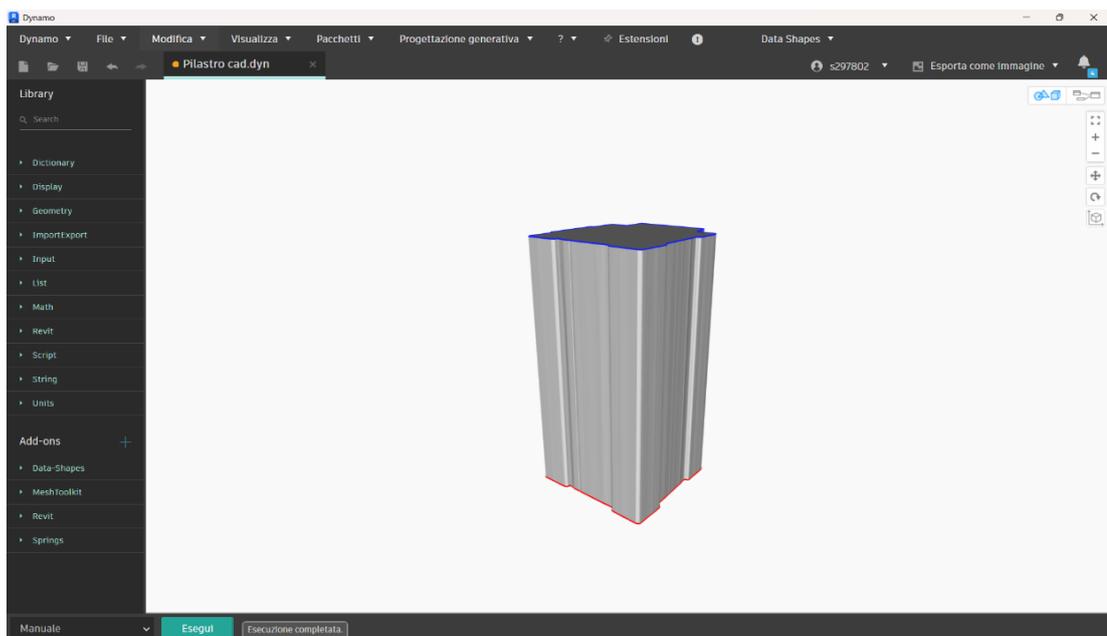


Figura 48 Rappresentazione del solido ottenuto dalla modellazione VPL.

5.1.4 Test 4: Elemento architettonico complesso, il soffitto cassettonato.

Sulla base dei test precedenti e della progressiva familiarità acquisita con l'ambiente di lavoro Dynamo, si è giunti alla sperimentazione diretta sull'elemento del cassettonato. Tale fase ha fatto emergere un interrogativo metodologico centrale: come affrontare la modellazione in modo alternativo, con l'obiettivo di ridurre il margine di errore umano e incrementare al contempo l'aderenza e la coerenza geometrica rispetto al rilievo, valutando anche il potenziale di una maggiore rapidità e ottimizzazione del processo nel lungo periodo.

Il processo è articolato in tre fasi:

- Clusterizzazione semplice e profilazione base: questo approccio si è rivelato poco affidabile a causa della discontinuità generata nelle curve compromettendo l'estrusione finale.
- Segmenti lineari e interpolazione: l'approccio risulta frammentato e poco efficiente, richiedendo la creazione manuale di connessioni e ricomposizione tra segmenti; inoltre, la discontinuità compromette la coerenza del profilo complessivo
-

Tutte le fasi hanno previsto una scrematura iniziale e un sub-sampling della nuvola di punti originale. Sebbene la metodologia sia stata già illustrata nel paragrafo precedente, si riassume brevemente: la nuvola è stata trattata tramite CloudCompare ed esportata in formato compatibile con Dynamo Autodesk. L'intero flusso di lavoro si basa sulla gestione e manipolazione delle coordinate spaziali (X, Y, Z), finalizzate alla generazione di profili e alla modellazione dell'elemento architettonico.

Primo approccio – Clusterizzazione semplice e profilazione base

Il primo approccio ha previsto una strategia di raggruppamento per cluster basata sulle coordinate, al fine di generare sezioni trasversali da cui ottenere i profili.

Fin da subito, tuttavia, è emerso un primo ostacolo: nonostante il sub-sampling, la nuvola di punti manteneva un'elevata densità, con coordinate espresse fino a otto decimali. Per gestire tale complessità è stato utilizzato il nodo Math.Round, che ha permesso di controllare il livello di aggregazione e modulare la dimensione dei cluster.

Modificando il numero di decimali considerati, si ottiene una notevole variazione nella definizione delle sezioni: ad esempio, raggruppare a una cifra decimale rispetto a cinque

produce sezioni trasversali di ampiezza molto diversa.

La fase successiva ha previsto la generazione dei profili tramite il nodo *NurbsCurve.ByPoints*. Tuttavia, tale operazione richiede un ordinamento preliminare dei punti, passaggio particolarmente delicato. Senza un ordinamento coerente, la curva risultante non è generabile o presenta errori significativi. È quanto accaduto in questo caso: una porzione della nuvola non rispettava l'ordinamento adottato (basato sull'asse Y), causando discontinuità nel tracciato.

Per risolvere la criticità, si è proceduto a un'ulteriore scomposizione della nuvola, segmentando le porzioni in base all'andamento. Le sezioni così isolate sono state trattate separatamente e successivamente ricomposte. Tuttavia, anche in questo scenario, le curve hanno continuato a presentare interruzioni e sovrapposizioni indesiderate, rendendo poco affidabile l'estrusione solida.

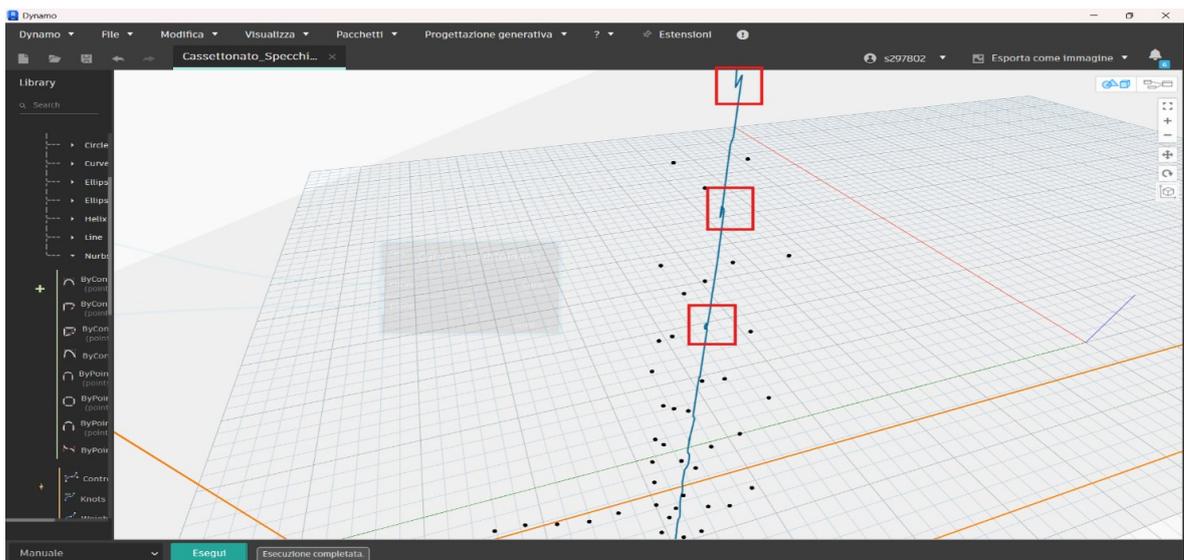


Figura 49 in figura sono inquadrati in rosso le sovrapposizioni o la non continuità della linea, problematica principale di questa metodologia.

Secondo approccio – Segmenti lineari e interpolazione

Nel secondo tentativo si è mantenuta l'impostazione generale ma con una variazione significativa: invece di curve continue, sono stati generati segmenti lineari interpolanti tramite il nodo *Line.ByBestFitThroughPoints*. Dopo aver suddiviso e ordinato i punti in sezioni, per ciascuna è stata tracciata una linea, poi connessa alle altre per ottenere il profilo

completo.

Anche questo metodo, però, ha mostrato delle debolezze: sono emerse discontinuità e incoerenze tra le porzioni, rendendo difficile una modellazione coerente e unitaria dell'intero elemento.

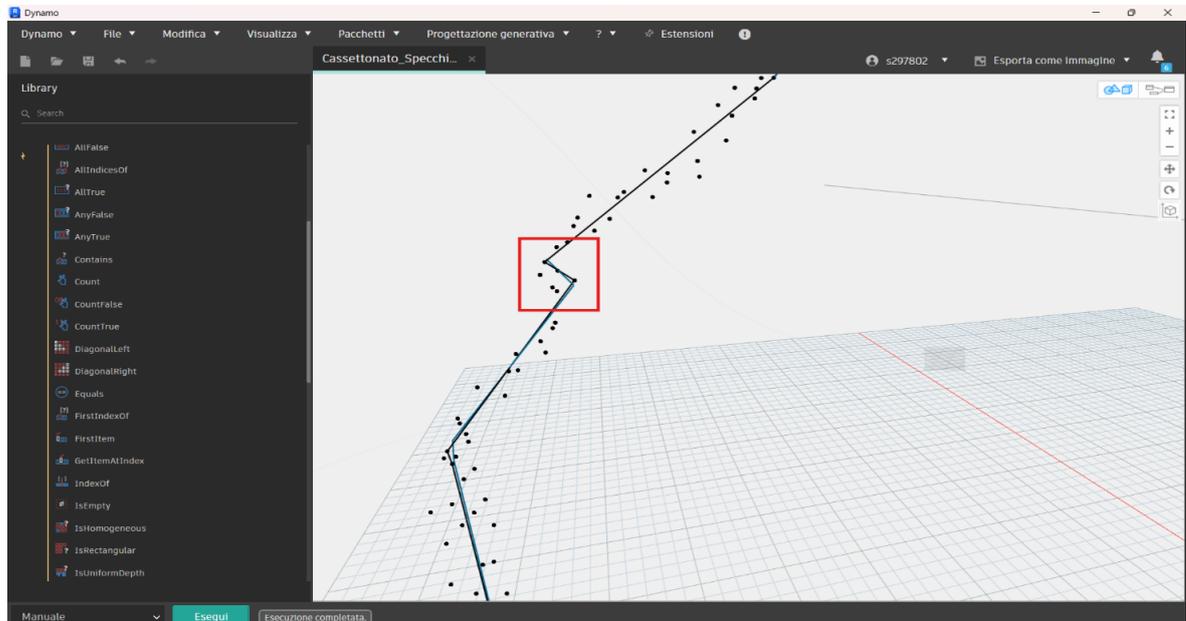


Figura 50 evidenza della non linearità nella profilazione della specchiatura oggetto di sperimentazione. I segmenti non devono sovrapporsi.

Terzo approccio – Clusterizzazione intelligente e strategia adattiva

Nel terzo tentativo è stata introdotta una strategia più strutturata, costruita anche sulla base dei risultati e degli errori dei metodi precedenti. Il nuovo approccio si fonda su una clusterizzazione mirata della nuvola, unita a ordinamenti adattivi che tengano conto della morfologia locale dell'elemento.

La nuvola è stata inizialmente suddivisa in due porzioni principali: superiore e inferiore. La parte superiore, caratterizzata da un andamento più orizzontale o inclinato, è stata trattata con un ordinamento basato sull'asse Y. La parte inferiore, con sviluppo verticale, è stata invece gestita rispetto alla coordinata X.

Come descritto, si è quindi avviato un processo di clusterizzazione per ottenere sezioni sia trasversali sia longitudinali, creando una griglia di riferimento da cui ricavare lo scheletro geometrico per la profilazione.

Dopo aver individuato le porzioni di punti necessarie, è stato definito un piano verticale per ciascuna sezione, sul quale traslare le curve NURBS. Questa traslazione garantisce linearità e coerenza nei profili.

- ***Preparazione delle sezioni e creazione dei profili***

Le sezioni selezionate sono state suddivise per lati in base all'andamento geometrico. Ogni lato è stato ulteriormente clusterizzato (utilizzando `Math.Round`), ottenendo due sottosezioni visivamente distinte. Le porzioni sono state poi ricomposte con `CreateList` e appiattite (`List.Flatten`) per generare una lista ordinata.

Su questa base è stata costruita la curva di profilo tramite `NurbsCurve.ByControlPoints`, nodo che consente di modellare la curva sfruttando i punti di controllo, senza l'obbligo che essa li interpoli. Ciò consente di ottenere un profilo più regolare, modulabile tramite il parametro `Degree`, che regola quanto la curva aderisce ai punti o li approssima. Una volta definita la curva, questa è stata traslata sul piano verticale corrispondente, rendendola pronta per le operazioni di loft.

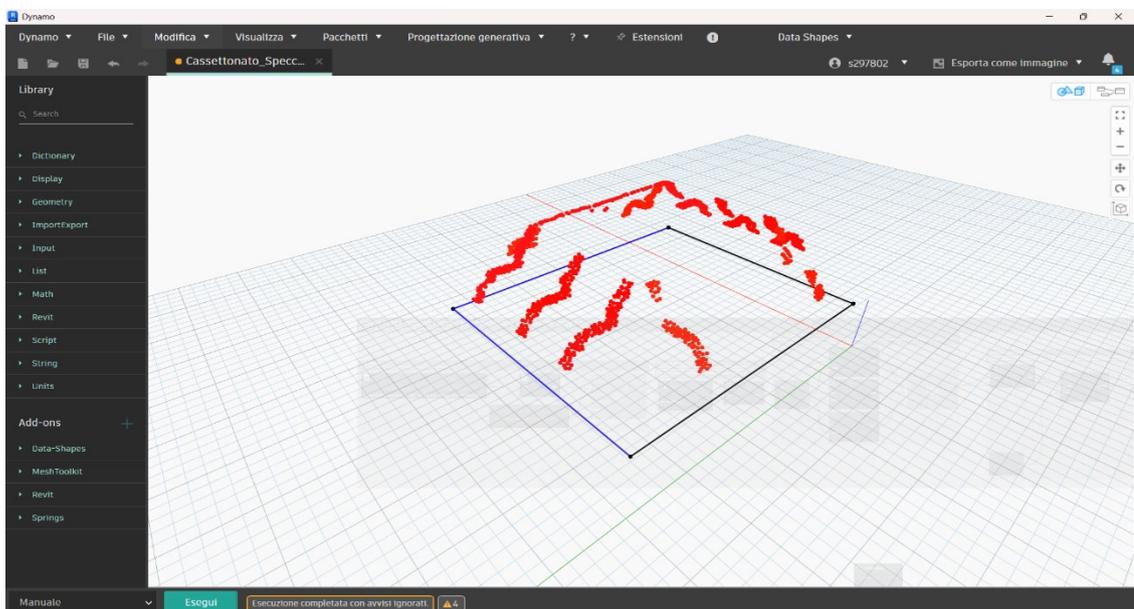


Figura 51 l'immagine evidenzia le sezioni scelte attraverso la clusterizzazione.

- **Riordinamento dei punti e generazione delle superfici**

Ogni lato dell'elemento viene trattato individualmente. Una volta riunite le due liste dello stesso lato, si procede con il riordinamento, che nella parte superiore è stato effettuato in base alla coordinata Y, coerente con l'andamento orizzontale/inclinato dei punti. Completato l'ordinamento, il profilo viene generato, con la possibilità di modificarne forma e morbidezza attraverso i punti di controllo. La curva viene quindi posizionata sul piano verticale, e da qui si esegue l'operazione di loft tra profili accoppiati, generando le superfici laterali dell'elemento.

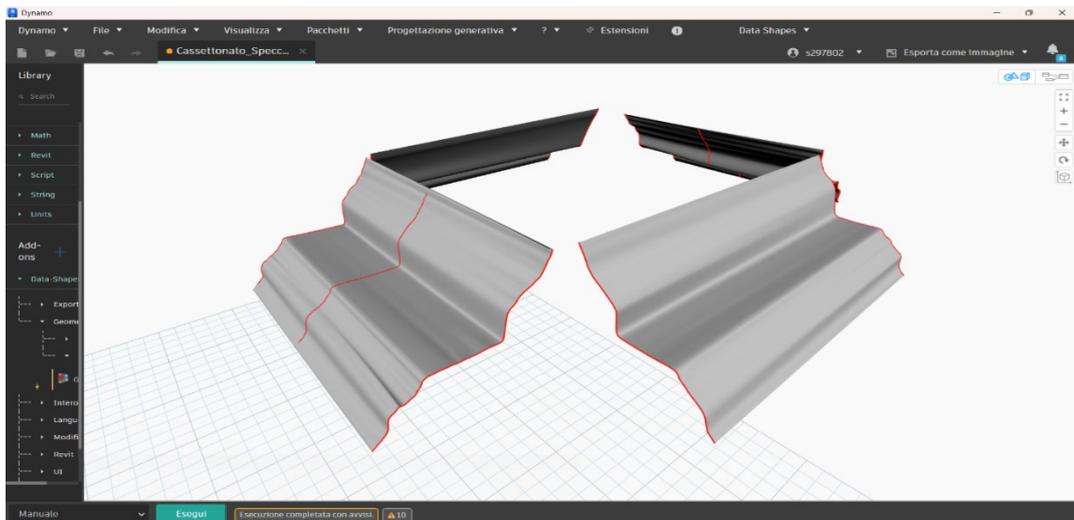


Figura 52 Rappresentazione dei profili laterali, della parte superiore della specchiatura oggetto di ricerca, generati e posizionati sui piani verticali, successivamente uniti tramite loft per ottenere le superfici dell'elemento.

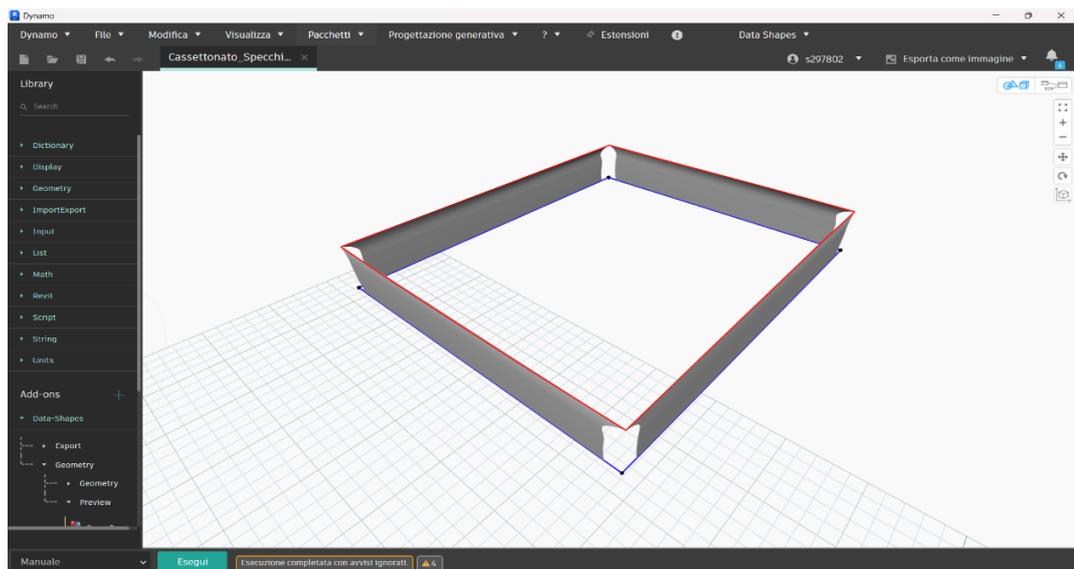


Figura 53 La figura mostra i profili laterali, della parte inferiore della specchiatura oggetto di ricerca, generati e posizionati sui piani verticali, successivamente uniti tramite loft per ottenere le superfici dell'elemento.

- **Trattamento degli angoli e profilazione avanzata**

La definizione dell'angolo ha inizialmente previsto l'uso di operazioni booleane, che si sono però rivelate inaffidabili a causa dei bassi angoli di incidenza tra superfici quasi orizzontali. La scarsa tolleranza numerica ha prodotto intersezioni errate.

È stato quindi adottato un metodo alternativo basato sull'intersezione delle superfici con *Geometry.Intersect*, seguito dall'identificazione dei punti problematici tramite *NurbsCurve.ControlPoints*. I punti indesiderati sono stati rimossi, e dai restanti è stata generata una curva più fedele, poi traslata su un piano *Best Fit*. Le curve così ottenute sono state utilizzate per eseguire i loft finali tra i profili laterali e quelli di spigolo, completando la modellazione dell'angolo.

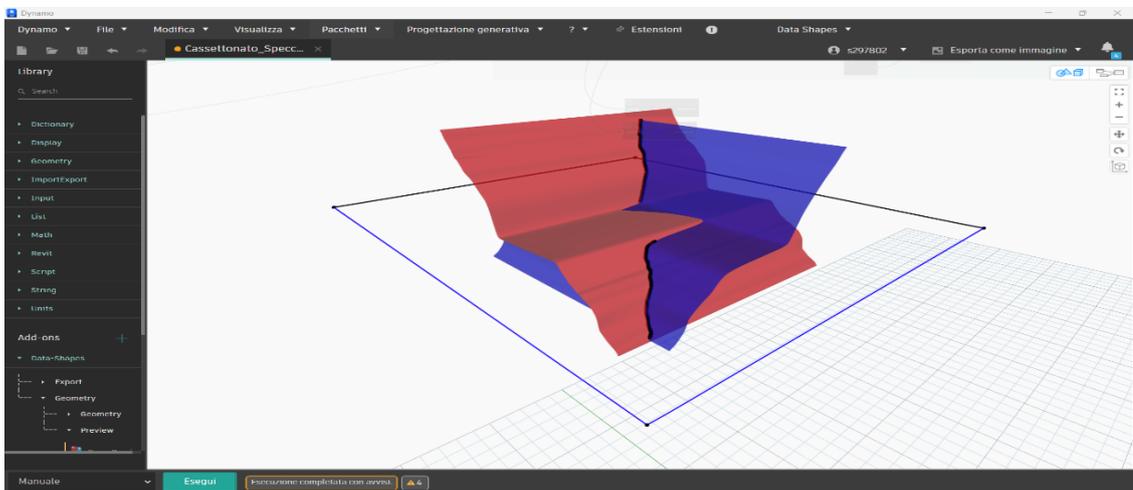


Figura 54 In figura si osservano i prolungamenti dei lati, utili per individuare il punto di intersezione e ricavare così una profilazione precisa dell'angolo.

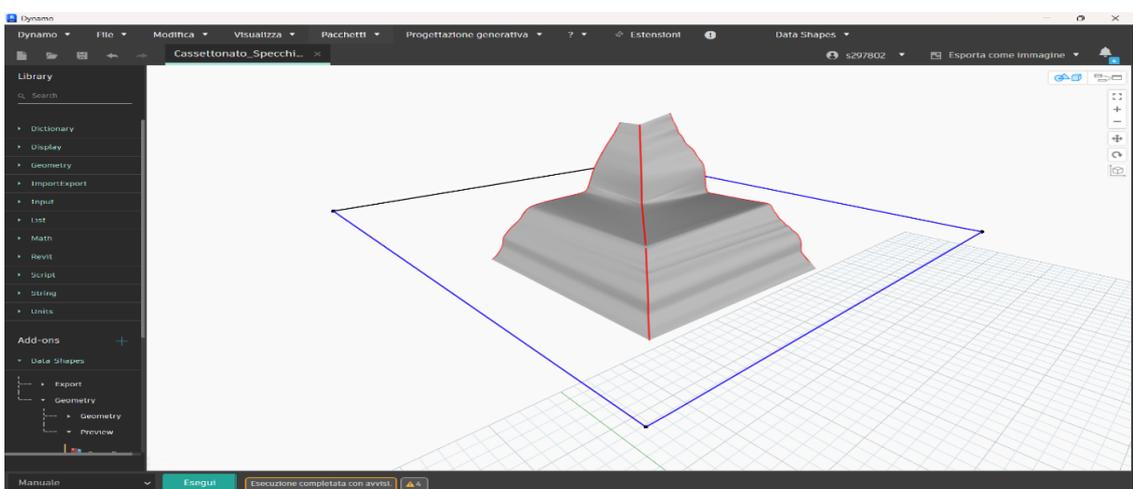


Figura 55 Nell'immagine si osserva la generazione del profilo angolare, che viene successivamente impiegato per creare una superficie continua tra i contorni, secondo lo stesso approccio applicato alle altre porzioni dell'elemento.

Prima di procedere alla validazione metrica, è stato utile osservare visivamente il risultato della modellazione della specchiatura ottenuta tramite lo script Dynamo. Questo passaggio ha permesso una prima verifica qualitativa, evidenziando subito le deformazioni geometriche tipiche della nuvola di punti e il grado di aderenza del modello generato rispetto al soggetto reale.

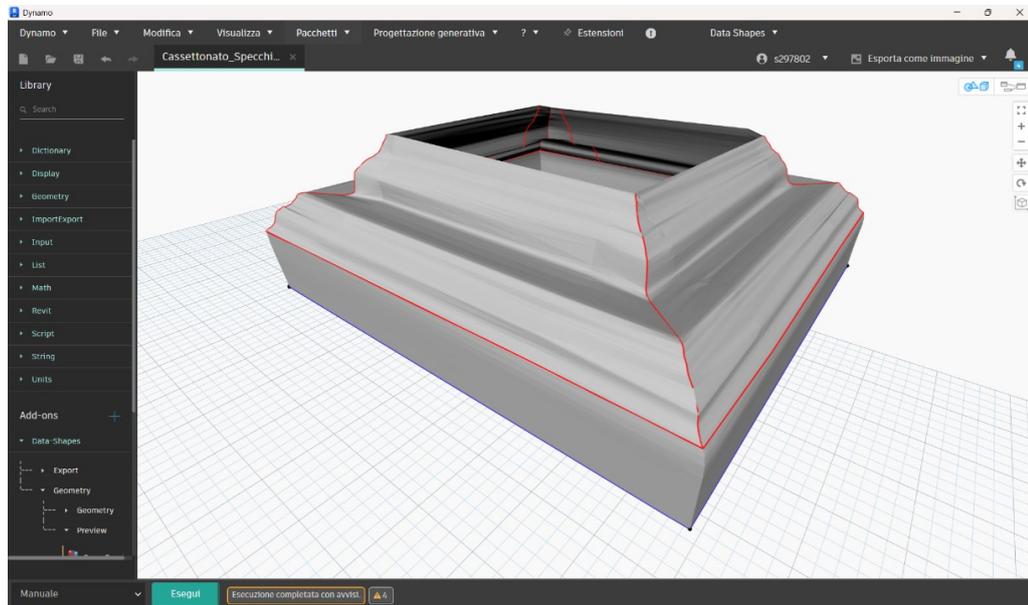


Figura 56 L'immagine mostra la specchiatura modellata direttamente all'interno di Dynamo per Revit, prima della fase di validazione metrica.

5.2 Validazione metrica

L'obiettivo della fase finale di validazione metrica attraverso diversi test è la comprensione di quale sia il livello di aderenza alla realtà che si può ottenere attraverso una modellazione semi-automatica come la VPL, in un contesto controllato.

La validazione metrica si basa sul confronto tra superfici dal punto di vista metrico, cioè un'analisi di deviazione in termini di vettori distanza tra una superficie di riferimento e una superficie di analisi, quella di cui si intende esprimere un **Livello di Accuratezza (LOA)**.

Come già discusso precedentemente, si è scelto di partire da una regola attraverso il primo test e verificare la sua efficacia su più elementi:

- porzione di parallelepipedo di una nuvola sintetica;
- elemento architettonico semplice come il pilastro;
- specchiatura del soffitto cassettonato delle Sala delle Guardie Svizzere.

Gli oggetti confrontati sono stati:

- la modellazione da VPL (*Dynamo*);
- la modellazione parametrica *as-built* (*plug-in* di *Autodesk Revit*);
- il dato di partenza, cioè la nuvola di punti, nelle sue porzioni selezionate, derivante dal dato primario del rilievo metrico utilizzato per creare il modello HBIM (*Autodesk Revit*).

Il confronto è stato eseguito attraverso un *plug-in* implementato nell'interfaccia di *Cloud Compare*, software Open Source. Il *plug-in cloud-to-cloud* o *cloud-to-mesh* permette di selezionare e avviare la verifica analizzandone la deviazione tra nuvola di punti, o percentuale di essa, i dati di partenza, e mesh esportata da *Dynamo* della modellazione dell'elemento, viene calcolata la distanza tra punto e superficie. L'obiettivo non è solo rilevare differenze numeriche ma comprendere come queste differenze possano influire sul modello HBIM e in quali e quanti punti il modello risulta semplificata.

Di seguito vengono presentate le immagini relative alla validazione metrica eseguita per ciascun test. Ogni validazione è composta da tre fasi distinte: il dato di partenza, rappresentato dalla nuvola di punti; la mesh di esportazione generata tramite *Dynamo*; infine, il risultato della validazione metrica ottenuto attraverso il calcolo della distanza tra nuvola e mesh.

- **L'elemento architettonico semplice: Il pilastro.**

Nelle seguenti rappresentazioni grafiche sono rappresentate rispettivamente: la nuvola di punti, che costituisce il dato di partenza relativo al pilastro; la mesh, ovvero l'esportazione del modello generato come descritto nei paragrafi precedenti, che consente di confrontare i punti rilevati con la superficie sviluppata attraverso la VPL; infine, la terza immagine mostra la validazione metrica, rappresentando mediante una scala cromatica dal rosso al blu le deviazioni tra i punti e il modello.

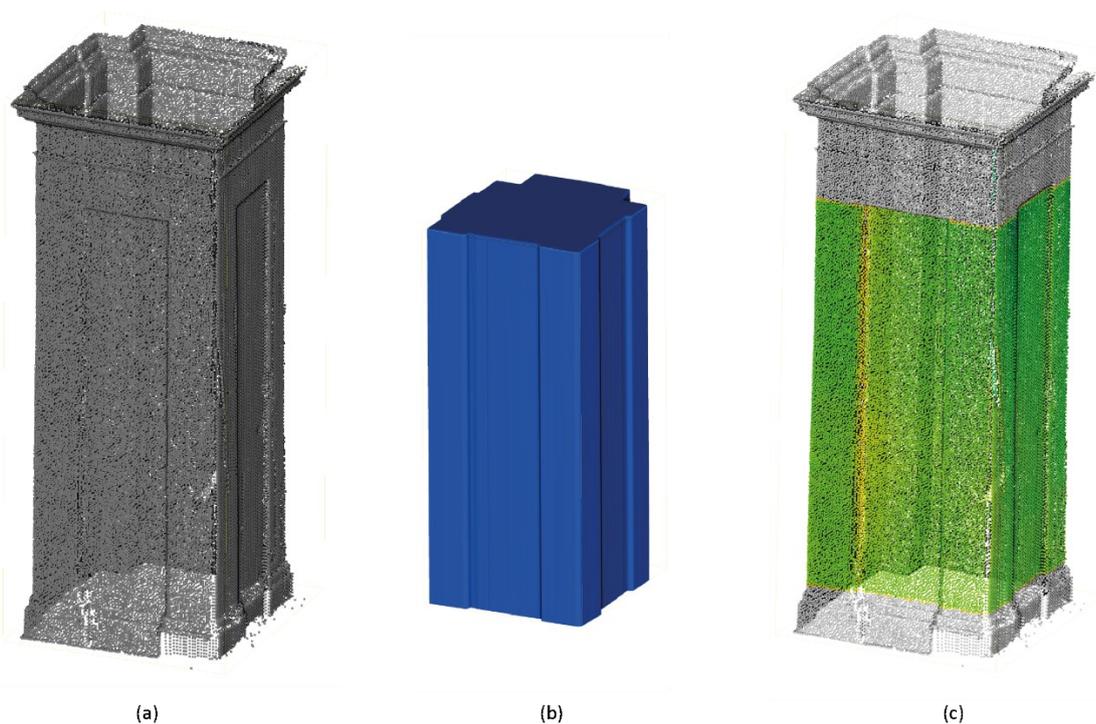


Figura 57 Modellazione dell'elemento pilastro: (a) rappresentazione del dato di partenza, la nuvola di punti; (b) mesh derivata dall'esportazione della modellazione 3D Dynamo, (c) la deviazione tra punti e superficie.

Di seguito l'istogramma delle deviazioni tra punto e superficie (Cloud to Mesh) conferma che per la maggior parte delle deviazioni si concentrano nell'intervallo tra -5 cm e $+5\text{ cm}$, con valori medi prossimi allo zero. Questi risultati convalidano l'aderenza del modello sviluppato con la programmazione visuale su Dynamo e il dato originale, la porzione di nuvola di punti scelta.

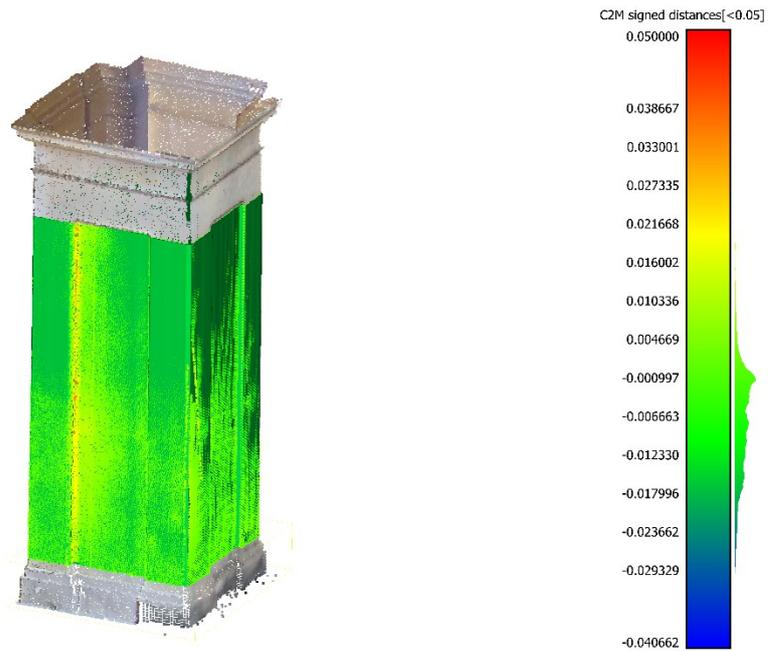


Figura 58 Immagine estrapolata da *CloudCompare*, validazione metrica Cloud-to-Mesh e scala rappresentativa dei risultati.

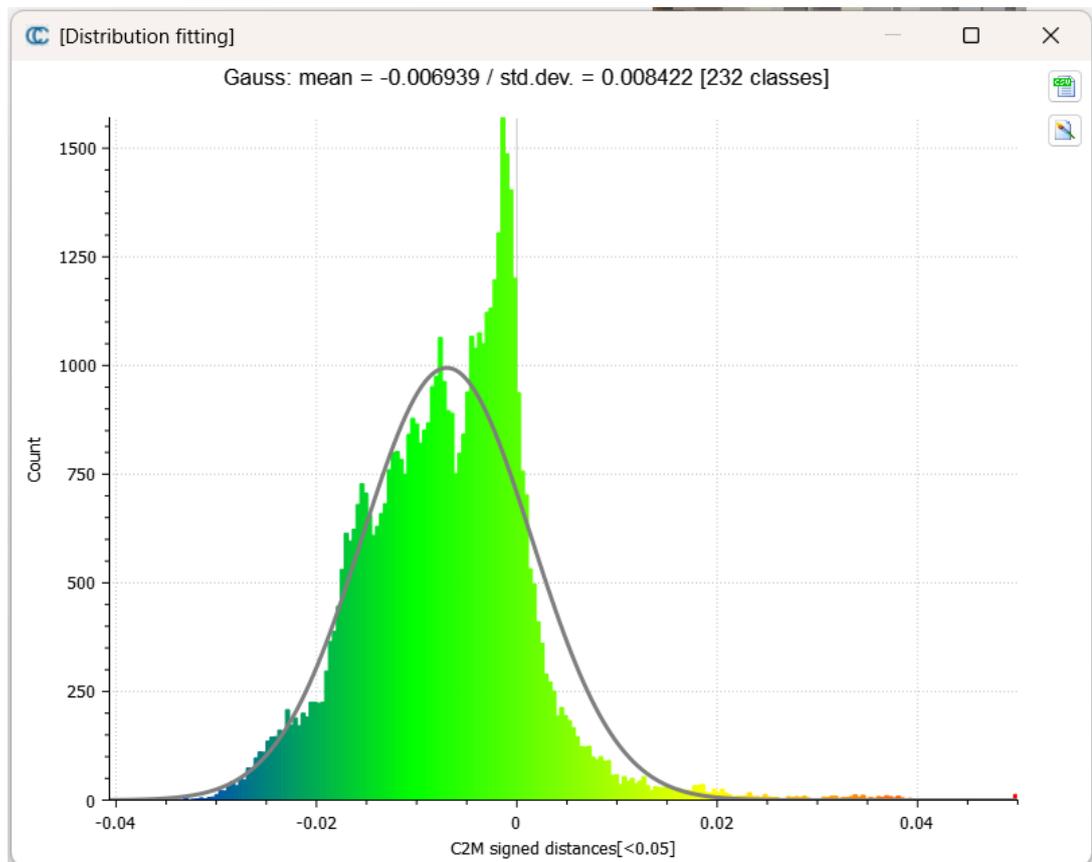


Figura 59 Istogramma rappresentativo delle deviazioni tra punti e superficie modellata attraverso la VPL.

- **Media (mean) = -0.006939** → indica uno scostamento medio di circa **$-6,9$ mm**; quindi, la mesh tende ad essere leggermente spostata rispetto alla nuvola di punti verso valori negativi.
- **Deviazione standard (std.dev.) = 0.008422** → pari a circa **$8,4$ mm**, mostra una dispersione più ampia rispetto al caso precedente: la distribuzione degli errori è più variabile.
- **Distribuzione curva:** la curva gaussiana evidenzia una distribuzione **asimmetrica**, con una coda più pronunciata verso sinistra (valori negativi). Il modello presenta uno scostamento medio di circa **7 mm** e una variabilità massima di circa **8 mm**.

- L'elemento architettonico complesso: la specchiatura del soffitto cassettonato ligneo.

Nelle seguenti rappresentazioni grafiche viene riportata la validazione metrica di una specchiatura, del soffitto cassettonato ligneo della Sala delle Guardie Svizzere. Rispetto agli elementi precedenti, il procedimento di modellazione risulta più complesso a causa delle forme articolate dell'elemento architettonico. Nonostante tali difficoltà, il metodo di validazione ha ottenuto buoni risultati. Infatti, è stata eseguita un'analisi di validazione metrica sia sull'elemento generato tramite modellazione tradizionale Autodesk Revit sia sull'elemento generato tramite modellazione VPL, al fine di confrontare l'affidabilità rispetto al dato rilevato. Di seguito viene rappresentata la nuvola di punti, il dato di partenza; la mesh estrapolata dalla modellazione VPL e la validazione metrica che evidenzia le deviazioni tra punti rilevati e modello.

Segue la validazione metrica eseguita su Cloud Compare sull'elemento generato tramite la modellazione VPL:

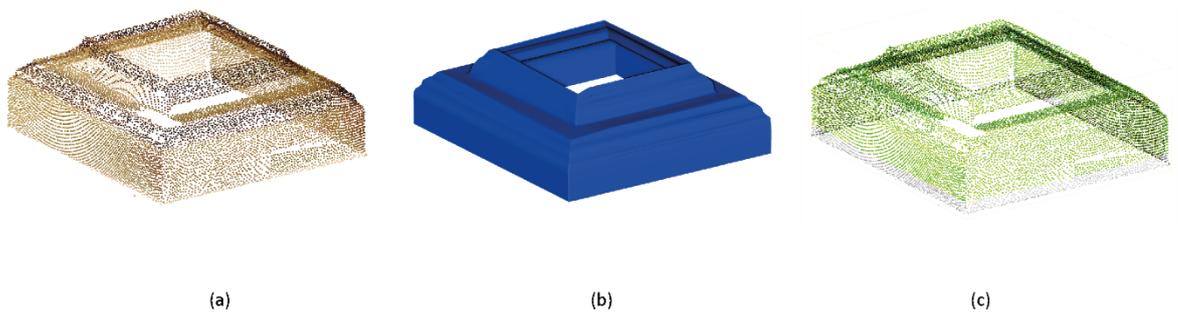


Figura 60 Modellazione su *Dynamo* dell'elemento specchiatura: (a) rappresentazione del dato di partenza, la nuvola di punti; (b) mesh derivata dall'esportazione della modellazione 3D *Dynamo*, (c) la deviazione tra punti e superficie.

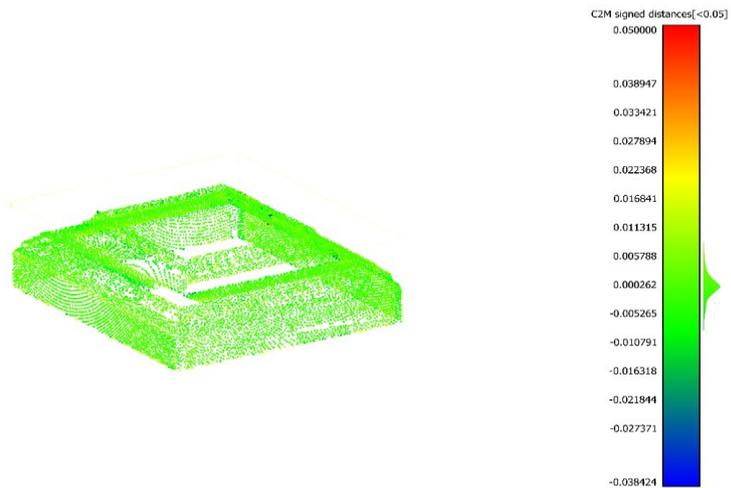


Figura 61 Immagine estrapolata da CloudCompare, validazione metrica Cloud-to-Mesh e scala rappresentativa dei risultati.

In figura è stato rappresentato l'istogramma di deviazione, risultato del calcolo di distanza tra punti del dato di partenza e la mesh. Il grafico conferma come la maggior parte delle deviazioni si concentri nell'intervallo tra -5 cm e $+5\text{ cm}$, con picco intorno allo zero. Si possono ritenere i risultati soddisfacenti e pienamente adeguati agli standard per la modellazione HBIM.

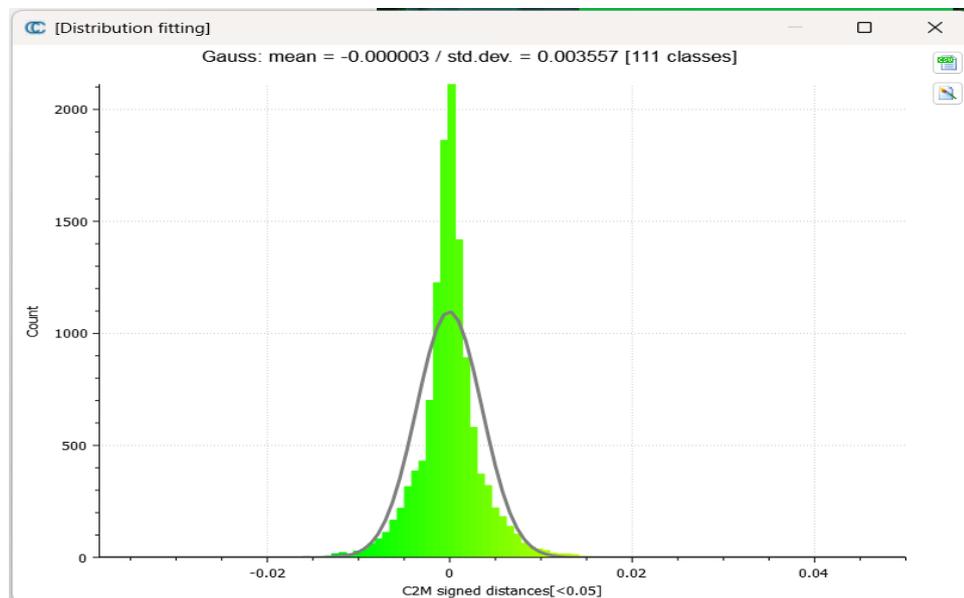


Figura 62 Istogramma rappresentativo delle deviazioni tra punti e superficie modellata attraverso la VPL.

- **Media (mean):** ~ 0.000003 \rightarrow praticamente nulla, quindi non ci sono deviazioni sistematiche evidenti tra nuvola di punti e mesh.
- **Deviazione standard (std. Dev.):** 0.003557 \rightarrow molto contenuta, indica una buona coerenza geometrica tra i due dataset.

- **Distribuzione gaussiana:** il suo andamento suggerisce che la distribuzione degli errori è sostanzialmente normale. I valori estremi sono tutti entro $\pm 2 - 4 \text{ mm}$, margine di tolleranza molto stretto, coerente con un buon allineamento tra mesh e nuvola.

Segue la validazione metrica eseguita su Cloud Compare sull'elemento generato tramite la modellazione VPL:

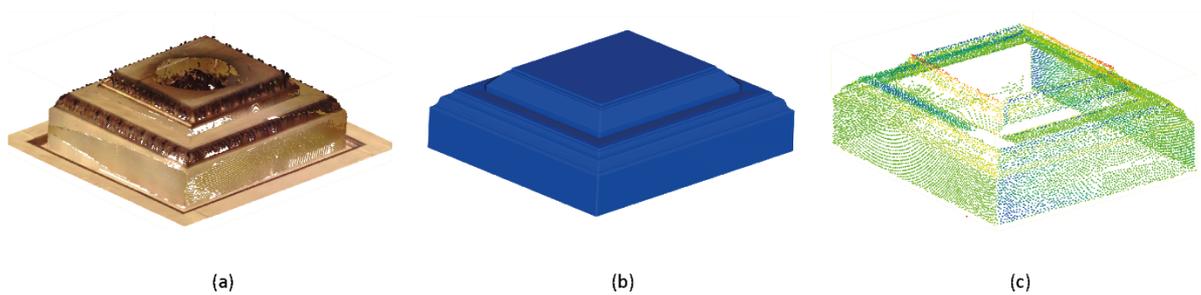


Figura 63 Modellazione su *Autodesk Revit* dell'elemento specchiatura: (a) rappresentazione del dato di partenza, la nuvola di punti; (b) mesh derivata dall'esportazione della modellazione 3D *Autodesk Revit*, (c) la deviazione tra punti e superficie.

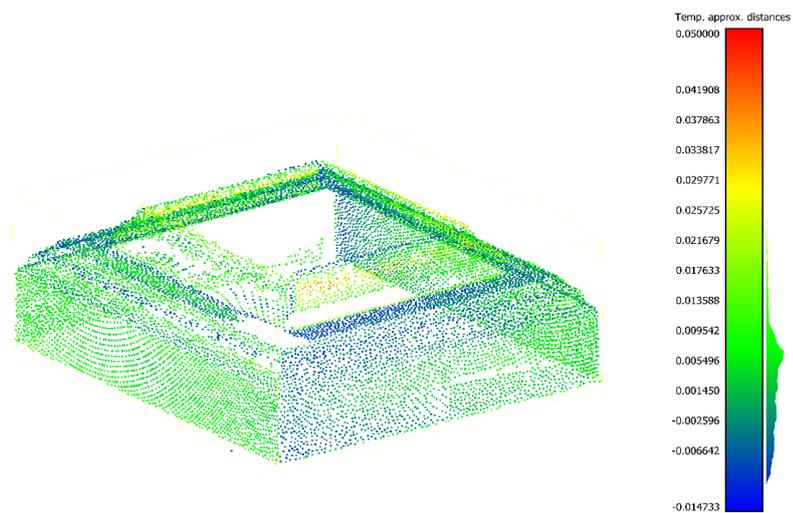


Figura 64 Immagine estrapolata da *CloudCompare*, validazione metrica *Cloud-to-Mesh* e scala rappresentativa dei risultati.

L'immagine sopra mostra il risultato dell'analisi *Cloud-to-Mesh Distance* effettuata sul modello 3D della specchiatura utilizzando la modellazione tradizionale Autodesk Revit. La scala cromatica la distanza tra punti e superficie, con valori che vanno da -1.5 cm a $+5\text{ cm}$.

Il risultato indica che in coincidenza di angoli e spigoli, dell'elemento architettonico, i punti si discostano dalla superficie generando, così, in corrispondenza di queste zone colorazioni gialle/rosse e blu. Questo accade per via dell'approssimazione della geometria, che spesso, si è costretti a fare nella modellazione tradizionale, in questo caso la modellazione è stata eseguita in Autodesk Revit.

Complessivamente l'istogramma evidenzia che la maggior parte dei punti rappresenta deviazioni contenute, confermando una buona aderenza tra nuvola e mesh. Tuttavia, si osserva, in coda al grafico, a destra, che alcuni valori arrivano fino a $+5\text{ cm}$, indicativo di aree localmente sopraelevate rispetto al dato di partenza. Si noti, anche, la parte sinistra del grafico che presenta valori negativi fino a -1.5 cm , evidenziando punti che si trovano al di sotto della mesh, questo probabilmente è dovuto alla semplificazione geometrica della modellazione eseguita in Autodesk Revit.

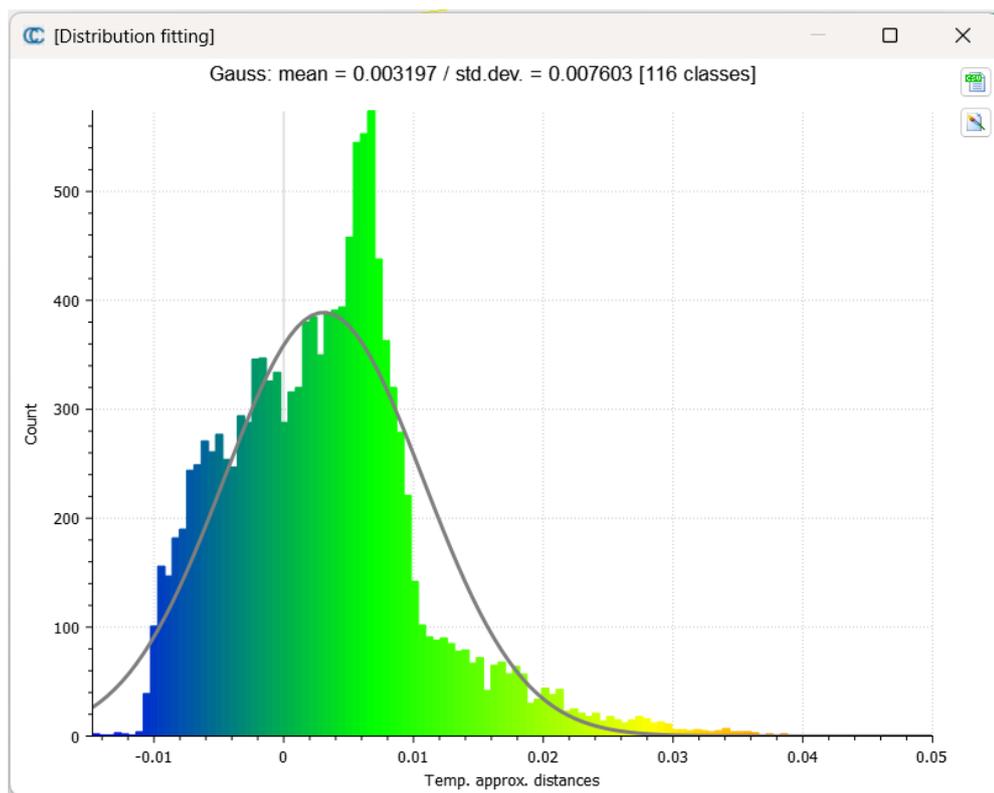


Figura 65 Istogramma rappresentativo delle deviazioni tra punti e superficie modellata attraverso la modellazione tradizionale su Autodesk Revit.

- **Media (mean): $+0,0032\text{ m}$** \rightarrow lo scostamento medio tra mesh e nuvola è praticamente nullo, solo **3 mm**; quindi, il modello è molto vicino alla nuvola di riferimento.

- Deviazione standard: $0,0076\ m$ → dispersione molto contenuta, con la maggior parte dei valori concentrati entro $\pm 7\ mm$.
- Distribuzione gaussiana: mostra un picco molto netto e una coda asimmetrica verso valori positivi.

- **Il soffitto cassettonato ligneo integrale, della Sala delle guardie Svizzere con modellazione tradizionale su Autodesk Revit**

Nelle seguenti rappresentazioni grafiche viene riportata la validazione metrica dell'intero soffitto cassettonato ligneo della Sala delle Guardie Svizzere. Il modello 3D, in questo caso, è stato eseguito su Autodesk Revit; la sua rigidità modellativa ha portato a delle semplificazioni geometriche soprattutto per particolari decorativi. L'interesse della ricerca, infatti, è rivolto principalmente all'aderenza alle superfici non concentrandosi sugli apparati puramente decorativi. Viene sottolineato quest'ultimo aspetto perché all'interno della validazione connessa alle mappe di deviazione, si riscontreranno anomalie legate a due fattori fondamentali del soffitto cassettonato, che però devono essere correttamente interpretate.

- Il primo aspetto è che, in ogni specchiatura, al centro è presente una decorazione che è stata volutamente trascurata nella modellazione, e che influirà nell'interpretazione dei risultati d'analisi.
- Il secondo è che, nella realtà, il soffitto cassettonato ha subito nel tempo una deformazione confluita in un evidente spanciamento di forma convessa, mentre la modellazione tradizionale su Autodesk Revit tende a regolarizzare questa deformazione, basandosi sulla ripetizione modulare dell'elemento lungo lo schema a scacchiera e attorno al percorso di bordo perimetrale della stanza.

Di seguito viene rappresentata la nuvola di punti, il dato di partenza; la mesh calcolata dalla modellazione Autodesk Revit e la validazione metrica che evidenzia le deviazioni tra punti rilevati e modello.

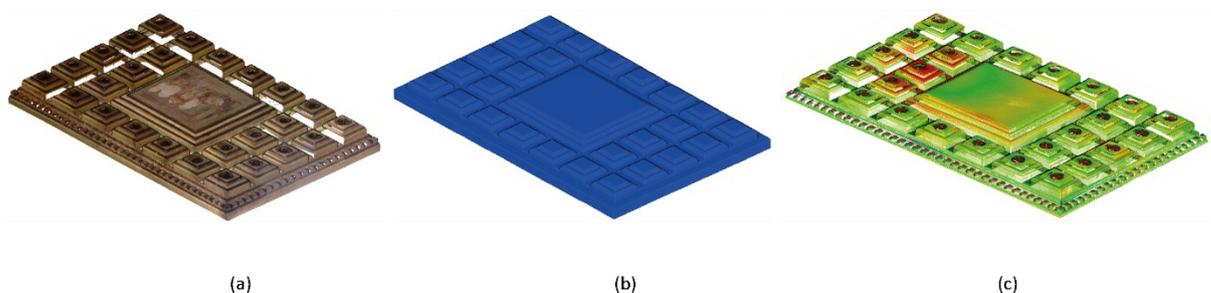


Figura 66 Modellazione su *Autodesk Revit* dell'elemento soffitto cassettonato: (a) rappresentazione del dato di partenza, la nuvola di punti; (b) mesh derivata dall'esportazione della modellazione 3D *Autodesk Revit*, (c) la deviazione tra punti e superficie.

L'immagine che segue è la rappresentazione della deviazione analizzata e calcolata su CloudCompare, si noti a destra la scala cromatica che indica i valori che sono compresi tra il -10 cm e $+10\text{ cm}$. In questo caso di analisi, sono state inserite più viste della stessa analisi per la più chiara comprensione degli aspetti morfologici della geometria in relazione con il leggero sfalsamento dei risultati di calcolo dell'analisi.

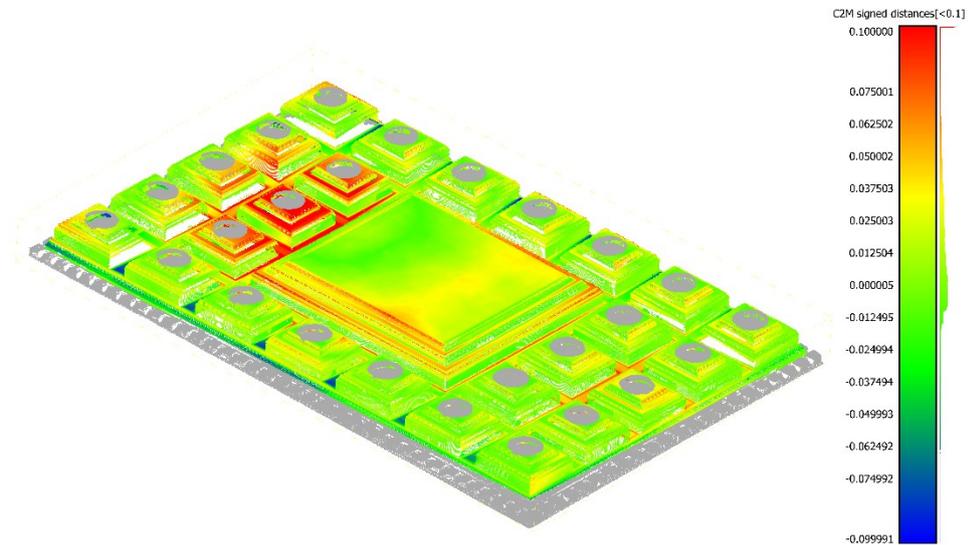


Figura 67 Immagine estrapolata da *CloudCompare*, Si noti come le parti in grigio siano state escluse dalla computazione così da poter avere un calcolo più veritiero rispetto alla semplificazione che è stata fatta con la modellazione di *Autodesk Revit*. Validazione metrica *Cloud-to-Mesh* e scala rappresentativa dei risultati.

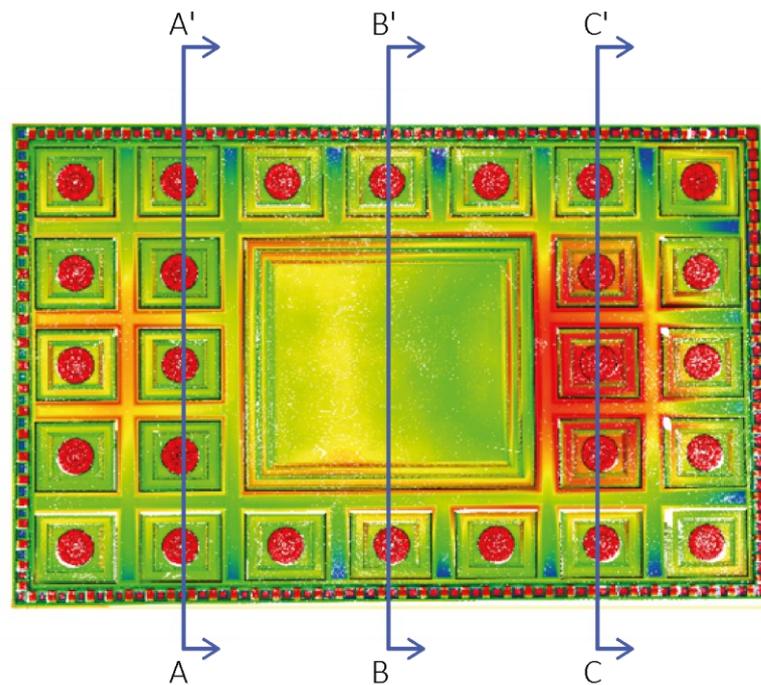


Figura 68 L'immagine rappresenta l'analisi di calcolo in *CloudCompare* in una vista di pianta.

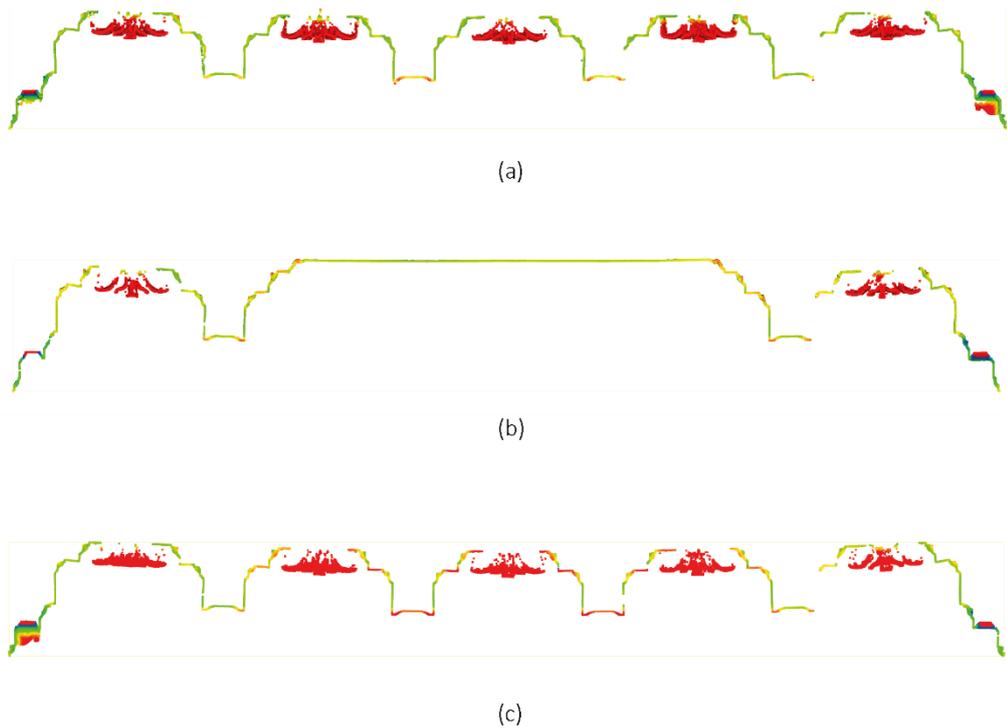


Figura 69 (a) sezione esportata da *CloudCompare* nella porzione a sinistra, sezione AA'; (b) sezione esportata da *CloudCompare* nella porzione centrale del soffitto cassettonato, sezione BB'; (c) sezione esportata da *CloudCompare* nella porzione di spanciamiento del cassettonato ligneo, sezione CC'.

Le figure riportate sopra rappresentano i risultati dell'analisi di validazione metrica condotta su *CloudCompare* per intero soffitto cassettonato. Si noti tutte le decorazioni centrali alle specchiature di colorazione rosso, come abbiamo detto in precedenza, quest'ultime non sono state modellate per semplificazione della geometria per la modellazione.

Le tre sezioni riportate a destra rispetto alla vista planare delle analisi (fig.68) permettono di comprendere meglio i risultati delle analisi. La sezione trasversale più in alto a destra rappresenta un taglio laterale sinistro, quella al centro mostra la sezione trasversale centrale del cassettonato, infine, l'ultima rappresenta una sezione laterale del lato destro passante per lo spanciamiento, area evidentemente più rossa nella vista planimetrica del cassettonato. Si può, quindi, notare che quest'ultima sezione presenti le parti inferiori centrali di collegamento tra le specchiature con una colorazione completamente rossa, indice dello spanciamiento reale del soffitto.

Segue l'immagine rappresentante l'esportazione dell'istogramma di deviazione, considerando le precedenti premesse rispetto

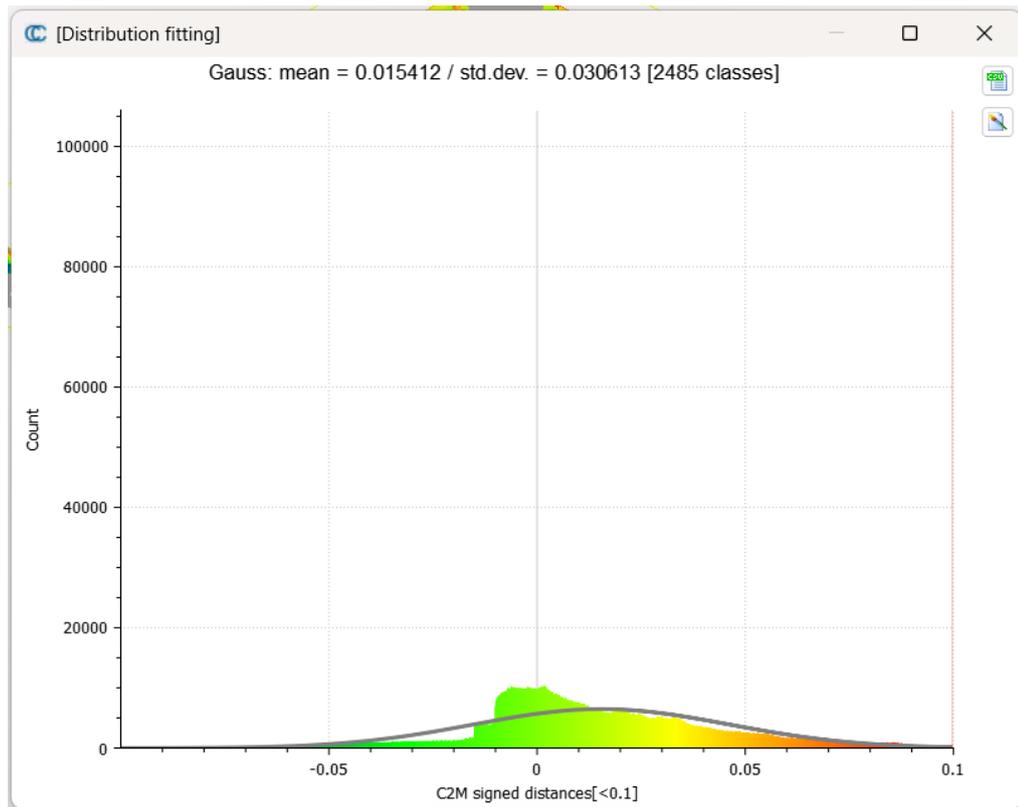


Figura 70 Istogramma rappresentativo delle deviazioni tra punti e superficie modellata attraverso la modellazione tradizionale su Autodesk Revit.

- **Media (mean):** +0,0154 m → i risultati mostrano come la mesh rispetto alla nuvola di punti si collochi mediamente **15 mm sopra** rispetto alla nuvola.
- **Deviazione standard (std. dev.):** 0,0306 m → indica una **discreta dispersione**, con la maggior parte degli errori entro **±3 cm** dal valore medio.
- **Distribuzione Gaussiana:** la curva nera mostra un buon adattamento a una distribuzione normale, ma con una leggera asimmetria.

6. Discussione e Risultati

Nel precedente capitolo sono stati mostrati i risultati delle validazioni metriche. I dati emersi confermano, in linea generale, ciò che era stato ipotizzato in fase preliminare: si supponeva, infatti, che la modellazione VPL garantisse una maggiore aderenza alla nuvola di punti e, in effetti, le validazioni metriche lo dimostrano.

È opportuno sottolineare fin da subito come il lavoro qui presentato non si configuri come una semplice ricerca compilativa, ma come un percorso di sperimentazione concreta, che ha portato allo sviluppo di una metodologia propria. Tale metodologia è stata costruita a partire dall'apprendimento autonomo degli strumenti VPL e dalla rielaborazione critica delle regole individuate attraverso la letteratura scientifica, trasformandole in un processo operativo applicabile a un caso reale. Per correttezza e trasparenza, è necessario precisare che nella modellazione della specchiatura, sia per quanto riguarda la VPL che la modellazione manuale su Revit, non sono state incluse le parti decorative centrali.

Nonostante ciò, i risultati ottenuti evidenziano differenze significative. Analizzando i singoli elementi, come il pilastro modellato esclusivamente tramite VPL, il margine di errore si attesta tra -5 cm e +5 cm, un risultato considerato soddisfacente.

Per quanto riguarda le specchiature, modellate sia con approccio VPL che con metodo tradizionale su Revit, si rilevano buoni risultati in entrambi i casi, ma con un netto vantaggio per quanto concerne la modellazione VPL, che non solo presenta una migliore aderenza metrica ma lascia intravedere un più ampio margine di miglioramento grazie al suo adattamento molto flessibile alla nuvola di punti.

Un elemento da sottolineare riguarda l'impatto delle semplificazioni geometriche nella modellazione tradizionale. Se si considera la sola specchiatura modellata su Revit, i risultati metrici appaiono comunque soddisfacenti; tuttavia, analizzando la validazione metrica dell'intero modello del soffitto cassettonato, emergono criticità più evidenti.

Si ricorda che l'intero soffitto è stato costruito attraverso il sistema di famiglie nidificate, con una specchiatura ripetuta per comporre il modello complessivo. In questo caso, le deformazioni reali dell'apparato ligneo e la semplificazione geometrica introdotta dal processo di modellazione tradizionale si sommano, amplificando gli errori già minimi rilevati nella singola specchiatura.

In conclusione, i risultati ottenuti mostrano come, su scala ridotta, i singoli elementi restituiscano una resa metrica soddisfacente, mentre quando si passa a elementi architettonici nidificati come un soffitto cassettonato l'errore complessivo tende ad aumentare. La sperimentazione dimostra che l'approccio VPL permette di calibrare meglio il livello di dettaglio e la fedeltà geometrica, adattandosi consapevolmente all'obiettivo specifico del modello: documentazione, analisi o gestione.

7. Discussione e Conclusioni

La sperimentazione evidenzia con chiarezza la potenzialità della modellazione visuale come alternativa concreta alla modellazione tradizionale, in particolare come valore aggiunto nei progetti sul patrimonio storico, dove le geometrie e le irregolarità spesso sfuggono agli strumenti più rigidi.

L'intero lavoro è stato sviluppato a partire da una posizione di totale inesperienza nell'ambito della programmazione visuale: ogni risultato, quindi, è frutto di un processo di apprendimento individuale e progressivo, senza formazione esterna o assistenza specifica, elemento che aggiunge valore metodologico alla sperimentazione.

Lo sviluppo degli script richiede un primo periodo di apprendimento più lungo, soprattutto in assenza di conoscenze pregresse di programmazione. Quando si passa a elementi complessi, gli script tendono a diventare più articolati e difficili da gestire, ma al contempo si è osservato come questi possano essere costruiti in modo progressivamente più mirato, adattandosi agli obiettivi e alle esigenze di modellazione poste dal caso specifico. Questo concetto di "modello adattivo" emerge come carattere fondamentale della VPL: il modello cambia forma e struttura in funzione delle domande che si intendono porre ai dati.

In ambito accademico, questa esperienza mette in luce l'importanza della documentazione trasparente anche di metodi ancora acerbi, poiché proprio tali sperimentazioni rappresentano un contributo reale alla crescita collettiva di competenze e conoscenze nel settore.

Opportunità:

- Modellazione più aderente alla realtà in presenza di geometrie complesse.
- Possibilità di creare un modello adattivo in base agli obiettivi del progetto (documentazione, analisi, gestione).
- Riduzione degli errori ripetitivi legati alla modellazione manuale.
- Incremento di coerenza e uniformità tra gli oggetti modellati.
- Possibilità di integrazione futura con intelligenza artificiale per automazione avanzata.
- Stimolo all'evoluzione delle librerie HBIM adattabili al patrimonio storico.

- Percorso di apprendimento replicabile da altri ricercatori grazie alla documentazione completa dei passaggi e alla trasparenza metodologica.

Limiti e criticità:

- Complessità crescente degli script in presenza di geometrie articolate.
- Dipendenza dalla qualità e ottimizzazione della nuvola di punti iniziale.
- Carico computazionale elevato su macchine non performanti.
- Difficoltà di trasferibilità diretta degli script senza formazione adeguata.
- Assenza di standard consolidati HBIM nel patrimonio culturale, con difficoltà a garantire interoperabilità tra modelli.

In conclusione, il percorso svolto ha permesso di verificare la concreta possibilità di integrare strumenti di programmazione visuale in ambiente BIM nella documentazione del patrimonio storico, superando alcuni limiti noti dei software tradizionali.

La modellazione VPL si configura come strumento capace di restituire un modello informativo maggiormente coerente con la realtà rilevata, pur evidenziando la necessità di una selezione consapevole delle tecniche in base agli obiettivi prefissati. È proprio la flessibilità e adattabilità dell'approccio semi-automatico il punto più rilevante, in quanto consente di calibrare il livello di semplificazione o dettaglio non solo sulla base della complessità geometrica, ma anche e soprattutto sugli scopi finali del modello.

L'esperienza maturata conferma la necessità di conoscenze trasversali: solo integrando competenze digitali, conoscenze storiche, rilievo geometrico e modellazione informativa si riesce a costruire un processo realmente efficace per l'HBIM.

In prospettiva futura, il lavoro costituisce un esempio di sperimentazione replicabile, che propone non un prodotto conclusivo ma una metodologia aperta, adattabile e perfezionabile, capace di rispondere alle specificità sempre diverse del patrimonio culturale.

7.1 Prospettive Future

Le prospettive future delineano un panorama in rapida trasformazione, in cui le innovazioni tecnologiche si intrecciano sempre più strettamente con la gestione del patrimonio culturale.

L'integrazione tra intelligenza artificiale e programmazione visuale, l'elaborazione di librerie HBIM orientate all'architettura storica e l'adozione del digital twin introducono nuovi strumenti a supporto della documentazione, della manutenzione e della valorizzazione del costruito. In questo scenario emergono con chiarezza anche nuove esigenze formative, volte a formare figure professionali capaci di muoversi tra competenze digitali e sensibilità storica, in risposta a una crescente complessità dei processi di digitalizzazione.

- **Intelligenza artificiale e programmazione visuale:** l'unione tra strumenti visuali e algoritmi di *AI* apre nuove prospettive per riconoscere e classificare automaticamente gli elementi architettonici, attraverso i già presenti algoritmi di riconoscimento che si basano su reti neurali e beneficiando del costante avanzamento della ricerca in questo ambito. La combinazione tra strumenti di modellazione *VPL* e *AI* potrebbe rendere più rapida e precisa la creazione di modelli informativi complessi.
- **Librerie HBIM pensate per l'architettura storica:** nel corso delle sperimentazioni è emersa l'esigenza concreta di creare famiglie parametriche progettate su misura per gli edifici storici, andando oltre i limiti degli oggetti generici disponibili nei software BIM. Questo potrebbe rendere più rapida la modellazione di oggetti specifici dell'architettura.
- **Digital Twin per il patrimonio storico:** il digital twin si sta affermando anche nel settore dei beni culturali, non solo per documentare lo stato di conservazione ma anche per monitorare nel tempo, supportare la manutenzione e intervenire rapidamente in caso di criticità.
- **Competenze trasversali sempre più richieste:** cresce la domanda di figure professionali capaci di muoversi tra competenze digitali, conoscenze storiche e abilità progettuali. Un'evoluzione che richiede anche un ripensamento dei percorsi

formativi universitari, più vicini alle esigenze pratiche della digitalizzazione del patrimonio culturale.

In conclusione, il percorso sperimentale non si configura come una proposta conclusiva ma come una metodologia aperta, replicabile e adattabile, che dimostra la possibilità concreta di integrare la programmazione visuale nei flussi di lavoro HBIM, con particolare efficacia in ambito storico-architettonico.

8. Bibliografia

[Online] / auth. International BuildingInSmartIFC. - Giugno 12, 2025. - <https://www.buildingsmart.org/standards/bsi-standards/industry-foundation-classes/>.

"Take Care": i Musei Reali di Torino e la conservazione di un sistema complesso di beni [Book Section] / auth. Feroggio M.A.R.I.N.A. [et al.] // La conservazione preventiva e programmata. Venti anni dopo il Codice dei Beni culturali. - [s.l.] : Arcadia Ricerche, 2024.

A Framework of Point Cloud Simplification Based on Voxel Grid and Its Applications [Journal] / auth. Shi Le and Luo Jun // IEEE SENSORS JOURNAL. - Marzo 1, 2024. - 5 : Vol. 24. - pp. 6349-6357.

A review of point clouds segmentation and classification algorithms [Journal] / auth. Grilli Eleonora, Remondino Fabio and menna Fabio // The International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences. - 2017. - p. 6.

A review of spatial sampling [Journal] / auth. Wang Jin-Feng , Gao Bin-Bo and Ge Yong // Spatial Statistics. - [s.l.] : Elsevier B.V., 2012. - Vol. 2. - pp. 1-14.

A review on design inspired subsampling for big data [Journal] / auth. Yu Jun, Ai Mingyao and Ye Zhiqiang // Statistical Papers. - [s.l.] : Springer, 2024. - Vol. 65. - pp. 467–510.

A Review on Optimal Subsampling Methods for Massive Datasets [Journal] / auth. Yao Yaqiong and Wang HaiYing // Journal of Data Science. - CT, USA : [s.n.], Gennaio 2021. - 1 : Vol. 19. - pp. 151–172.

A SCALABLE APPROACH FOR AUTOMATING SCAN-TO-BIM PROCESSES IN THE HERITAGE FIELD [Article] / auth. Avena M., Patrucco, G., Remondino, F., and Spanò, A. // 10th Intl. Workshop 3D-ARCH "3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures", 21–23 February 2024. - Siena : [s.n.], 2024. - 2/W4 : Vol. Volume XLVIII. - pp. 25–31.

A semi-automated approach model architectural elements [Journal] / auth. Roman O [et al.] // The International Archives of the Photogrammetry. - 2023. - p. 8.

A structured framework for HBIM standardization: Integrating scan-to-BIM methodologies and heritage conservation standards [Journal] / auth. Salah Rnin [et al.] // Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage. - 2025. - Vol. Volume 37.

Accelerating circular cities with semi-automatic building information modeling for existing buildings [Journal] / auth. Triantafyllidis Georgios [et al.] // Journal of Cleaner Production. - [s.l.] : Elsevier Ltd., 2025. - 145783 : Vol. 514. - p. 12.

An Innovative Learning Approach for Enhancing Basic Programming Skills Through Virtual Lab [Journal] / auth. Zakiah Azizah [et al.] // TEM Journal. - Maggio 2025. - 2 : Vol. 14. - pp. 1629-1641.

An Iterative Coarse-to-Fine Sub-Sampling Method for Density Reduction of Terrain Point Clouds [Journal] / auth. Fan Lei and Atkinson Peter M. // Remote Sensing. - 2019. - 947 : Vol. 11. - p. 11.

Automatic reconstruction of as-built building information models from laser-scanned point clouds: A review of related techniques [Journal] / auth. Tang P. [et al.] // Automation in Construction. - 2011. - 7 : Vol. 20.

Automating Built Heritage Modelling for the Integration into 3D City Models [Journal] / auth. Aboohamzeh A., Avena M. and Spanò A. // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. - 2024. - Vols. XLVIII-4/W10-2024.

BIM goals and uses in the management, maintenance, and preservation of historic buildings: an open access perspective. Implementation characteristics of HBIM for improved documentation and lifecycle management. [Journal] / auth. Siewczyński Borys and Szot Jan // npj | Heritage Science. - Aprile 2025. - 103 : Vol. 13. - p. 10.

Boolean operations with implicit and parametric representation of primitives using R-functions [Journal] / auth. Fougerolle Y. D. [et al.] // IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. - 2005. - 5 : Vol. 11.

Buildin Information modelling for cultural heritage: a review [Journal] / auth. Logothetis S, Delinasiou A and Stylianidis E // ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. - 2015. - p. 7.

COFFERED CEILINGS IN THE CHURCHES OF ROME, FROM THE 15TH TO THE 20TH CENTURY [Book Section] / auth. Tosini Arianna // Remarkable historic timber roofs. Knowledge and conservation practice / book auth. Gulli Riccardo. - [s.l.] : TEMA: Technologies Engineering Materials Architecture, 2022. - Vols. Vol. 8, Special Issue.

Commission invites Member States to contribute to a collection of 3D-digitised cultural heritage assets [Online] / auth. Commission European // Digital Strategy - European Commission. - Giugno 21, 2023. - <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/news/commission-invites-member-states-contribute-collection-3d-digitised-cultural-heritage-assets>.

Consolidamento e restauro delle strutture in legno [Book] / auth. Aveta Aldo. - Palermo : Dario Flaccovio Editore, 2013. - p. 239.

Creation of parametric BIM objects from point clouds using NURBS [Journal] / auth. Barazzetti L. [et al.] // The Photogrammetric Record. - 2015. - 152 : Vol. 30. - pp. 339-362.

Digital Europe Programme: Commission opens calls to invest in data spaces for tourism and cultural heritage [Online] / auth. Commission European // Shaping Europe's Digital Future. - Settembre 28, 2023. - <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/news/digital-europe-programme-commission-opens-calls-invest-data-spaces-tourism-and-cultural-heritage>.

Digital Europe Programme: Commission opens calls to invest in data spaces for tourism and cultural heritage [Online] / auth. Commission European // Shaping Europe's Digital Future. - settembre 28, 2023. - <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/cultural-heritage>.

Digital Guide IONOS [Online] / auth. IONOS Digital Guide // ionos.it. - 03 18, 2024. - <https://www.ionos.it/digitalguide/server/know-how/cose-un-kernel/>.

Documentation for Architectural Heritage: A Historical Building Information Modeling Data Modeling Approach for the Valentino Castle North Wing [Journal] / auth. Li Xiang, Teppati Losè Lorenzo and Rinaudo Fulvio // ISPRS International Journal of Geo-Information. - Marzo 2025. - 139 : Vol. 14. - p. 24.

Dynamic Downsampling Algorithm for 3D Point Cloud Map Based on Voxel Filtering [Journal] / auth. Lyu Wenqi [et al.] // Applied Sciences. - [s.l.] : Antonio Fernández-Caballero, 2024. - 3160 : Vol. 14. - p. 16.

European Commission [Online] / auth. Commission European // Common European Data Space for Cultural Heritage: Commission proposes a common European data space for cultural heritage. - Novembre 10, 2021. - <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/news/commission-proposes-common-european-data-space-cultural-heritage>.

European Museum Collaboration and Innovation Space [Online] / auth. Commission European // CORDIS. - 2023. - https://cordis.europa.eu/programme/id/H2020_DT-TRANSFORMATIONS-24-2020/en.

Expert Group on a common European Data Space for Cultural Heritage [Online] / auth. Commission European // Shaping Europe's Digital Future. - Dicembre 17, 2021. - <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/news/expert-group-common-european-data-space-cultural-heritage>.

Exploring HBIM Applications in Preserving the Architectural Legacy / auth. Aboohamzeh A // The case study of Torino Esposizioni. - supervisors: Spanò, Avena Politecnico di Torino, M.thesis, 2023.

Extended Reality and Informative Models for the Architectural Heritage: From Scan-to-BIM Process to Virtual and Augmented Reality [Journal] / auth. Apollonio F I, Gaiani A and Sunna M // Virtual Archaeology Review. - 2019. - 21 : Vol. 10. - pp. 14-27.

Faceting the post-disaster built heritage reconstruction process within the digital twin framework for Notre-Dame de Paris [Journal] / auth. Gros Antoine [et al.] // Scientific Reports. - 2023. - 5981 : Vol. 13.

HBIM for Conservation of Built Heritage [Journal] / auth. Alshawabkeh Yahya , Baik Ahmad and Miky Yehia // ISPRS International Journal of Geo-Information. - [s.l.] : Wolfgang Kainz, 2024. - 231 : Vol. 13. - p. 25.

HBIM Generation: Extending Geometric Primitives and BIM Modelling Tools for Heritage Structures and Complex Vaulted Systems [Conference] / auth. Lo Turco M and Dagnino F // 18th International Conference on Geometry and Graphics (ICGG 2018). - Milano : Springer. - pp. 569-578.

HBIM Open source: A Review [Journal] / auth. Diaria Filippo // International Journal of GEO-Information / ed. Department of Architecture and Design (DAD) Politecnico di Torino. - [s.l.] : Carlo Bianchini and Wolfgang Kainz, 2022. - 472 : Vol. 11. - p. 18.

HBIM: Background, Current Trends, and Future Prospects [Journal] / auth. Ávila Fernando [et al.] // Applied Sciences. - 2024. - 11191 : Vol. 14. - p. 23.

Historic building information modelling (HBIM) [Journal] / auth. Murphy M., McGovern E. and Pavia S. // Structural Survey. - 2009. - 4 : Vol. 27. - pp. 311-327.

I solai e soffitti quattrocenteschi di Palazzo Vecchio a Firenze [Book Section] / auth. Giorgi Luca // Conoscenza dell'edificio: casi -studio. - [s.l.] : SIRA.

IFC 4.3 approvato come standard finale [Online] / auth. Italia buildingSMART // buildingSMART Italia. - Dicembre 2023. - <https://www.buildingsmartitalia.org/ifc-4-3-approvato-come-standard-finale/>.

Il soffitto ligneo cassettonato della basilica di San Lorenzo a Firenze [Report] / auth. Fedeli Francesca.

Information Delivery Manual (IDM) [Online] / auth. International buildingSMART // buildingSMART International. - 03 22, 2024. - <https://technical.buildingsmart.org/standards/information-delivery-manual/>.

Insertion of 3-D primitives in mesh-based representations: Towards compact models preserving the details [Journal] / auth. Lafarge F., Keriven R. and Brédif M. // IEEE Transactions on Image Processing. - 2010. - 7 : Vol. 19.

ISO [Online] / auth. ISO // ISO. - Marzo 11, 2024. - <https://www.iso.org/home.html>.

KNOWLEDGE-BASED MODELLING FOR AUTOMATIZING HBIM OBJECTS. THE VAULTED CEILINGS OF PALAZZO DUCALE IN URBINO [Journal] / auth. Quattrini Ramona [et al.] // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences / ed. 29th CIPA Symposium “Documenting Understanding, Preserving Cultural Heritage: Humanities and Digital Technologies for Shaping the Future”, 25–30 June 2023. - Firenze : [s.n.], 2023. - Vols. Volume XLVIII-M-2-2023. - pp. 1271–1278.

L'architettura pratica dettata nella scuola e cattedra dell'insigne Accademia di S. Luca / dal prof. sig. cav. Giuseppe Valadier ; data alla luce dagli incisori d'architettura Giacomo Rocrué ed Eleuterio Catesi / auth. Valadier Giuseppe / compl. Trust Hathi. - Roma : [s.n.], 1831. - Vol. TOMO II.

London Charter [Online] / auth. Charter London // londoncharter, for the computer-based visualisation of cultural heritage. - 06 04, 2024. - <https://londoncharter.org/>.

Manuale del recupero del Comune di Roma. - [s.l.] : EDIZIONE DEI ROMA - TIPOGRAFIA DEL GENIO CIVILE. - pp. 117-334.

Manuali del Recupero e Codici di Praticastrumenti per l'apprendimento dell'arte di costruire e dell'architettura premoderna [Report] : Raccolta di estratti tratti da manuali e saggi di restauro / auth. Zampilli Michele. - 2008.

Methodology for an HBIM workflow focused on the representation of construction systems of built heritage [Journal] / auth. Martinelli Letizia , Calcerano Filippo and Gigliarelli Elena // Journal of Cultural Heritage. - [s.l.] : Elsevier Masson SAS, 2022. - Vol. 55. - pp. 277–289.

Musei Reali di Torino [Online] / auth. Cultura Ministero della. - 2024. - <https://museireali.beniculturali.it/esplora/>.

Non-uniform B-spline surface fitting from unordered 3D point clouds for as-built modeling [Journal] / auth. Dimitrov A., Gu R. and Golparvar-Fard M. // Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. - 2016. - Vol. 31.

Open Source HBIM and OpenAI: Review and New Analyses on LLMs Integration [Journal] / auth. Diara Filippo // Heritage. - [s.l.] : Nazarena Bruno and Federica Ottoni, 2025. - 149 : Vol. 8. - p. 17.

Parametric or Non-parametric? Understanding the Inherent Trade-offs between Forms of Object Representation [Conference] / auth. Rausch Chris, Zhao Yinghui and Haas Carl // Proceedings of the 37th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2020). - 2020.

Parametric Processes for the Implementation of HBIM—Visual Programming Language for the Digitisation of the Index of Masonry Quality [Journal] / auth. Calvano Michele [et al.] // ISPRS International Journal of Geo-Information. - [s.l.] : Wolfgang Kainz, 2022. - 93 : Vol. 11. - p. 19.

Progetto di ricerca applicata “Digitalizzazione del processo di conservazione” = PRIMA – Prevenzione Ricerca Indagine Manutenzione Ascolto per il patrimonio culturale / auth. Della Torre Stefano [et al.] // Progetto Musei Reali: Take Care Palazzo Reale, con Armeria e Biblioteca Reale, Cappella della Sindone, Giardini Reali / ed. Politecnico di Torino Politecnico di Milano. - Torino : [s.n.], 2023.

Scan-to-HBIM Reliability [Journal] / auth. Brusaporci Stefano [et al.] // Drones. - 2023. - p. 14.

Segmentation of point clouds using smoothness constraint [Journal] / auth. Rabbani T, Van den Heuvel F A and Vosselman G // ISPRS Commission V Symposium 'Image Engineering and Vision Metrology'. - 2006. - p. 6.

Segmentation of terrestrial laser scanning data using geometry and image information [Journal] / auth. Barnea Shahr and Filin Sagi // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. - 2012. - p. 16.

Semantic HBIM for Heritage Conservation: A Methodology for Mapping Deterioration and Structural Deformation in Historic Envelopes [Journal] / auth. Nieto-Julián Enrique [et al.] // Buildings. - [s.l.] : Rita Bento, 2025. - 1990 : Vol. 15.

Semantic interoperability for cultural heritage conservation: Workflow from ontologies to a tool for managing and sharing data [Journal] / auth. Moyano Juan [et al.] // Journal of Building Engineering. - 2023. - p. 16.

SENSORI LOW-COST PER IL MAPPING SPEDITIVO DI BENI CULTURALI. PRIMI TEST SU DI UNA STEADYCAM LOW-COST. [Journal] / auth. Calantropio Alessio [et al.] // DAD – Dipartimento di Architettura e Design, Politecnico di Torino. - 2017. - p. 10.

Social and economic transformations: opportunities and challenges [Online] / auth. Commission European // CORDIS. - https://cordis.europa.eu/programme/id/H2020_DT-TRANSFORMATIONS-20-2020/en.

Sperimentazione di una procedura per la creazione di un atlante digitale per la documentazione dei soffitti lignei dipinti di Sicilia [Conference] = Connettere. Un disegno per annodare e tessere. Linguaggi Distanze Tecnologie. / auth. Agnello Fabrizio and Cannella Mirco // Atti del 42° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione. - Milano : [s.n.], 2021. - pp. 1886-1883.

State of research in automatic as-built modelling [Journal] / auth. Pătrăucean V. [et al.] // Advanced Engineering Informatics. - 2015. - 2 : Vol. 29.

Structure-Aware Subsampling of Tree Point Clouds [Journal] / auth. Wang Di , Xu Kaijie and Quan Yinghui // IEEE GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING LETTERS. - 2022. - Vol. 19. - p. 5.

TECNICHE DI ACQUISIZIONE E DI MODELLAZIONE DI SOFFITTI LIGNEI: CONOSCENZA ANALITICA DEI FENOMENI DI DISSESTO [Journal] / auth. Fregonese Luigi and Taffurelli Laura // Politecnico di Milano, BEST-SITECH. - Milano : [s.n.]. - pp. 156-161.

TECNOLOGIA DEL RECUPERO DELLE STRUTTURE LIGNEE [Book] = Le Guide PETER COX / auth. Laner Franco. - [s.l.] : Flap Edizioni.

The Digital Europe Programme [Online] / auth. Commission European // Digital Strategy – European Commission. - <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/activities/digital-programme>.

THE GAMHER RESEARCH PROJECT FOR METRIC DOCUMENTATION OF CULTURAL HERITAGE: CURRENT DEVELOPMENTS [Journal] / auth. Bitelli G [et al.] // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. - 2019. - p. 8.

The GAMHER research project for metric documentation of Cultural Heritage: current developments. [Journal] / auth. Bitelli G [et al.] // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.. - 2019. - p. 8.

The IFC Standard- A review of history, development and standardization. [Journal] / auth. Laakso Mikael and Kiviniemi Arto // Journal of Information Technology in Construction. - 2012. - p. 28.

The IFC Standard- A review of history, development and standardization. [Journal] / auth. Laakso Mikael and Kiviniemi Arto // Journal of Information Technology in Construction. - [s.l.] : Turk Ž., May 2012. - Vol. 17. - pp. 134-161.

TOWARDS A SUSTAINABLE FRAMEWORK FOR INTEGRATING HBIM IN HERITAGE PRESERVATION [Conference] = 06-09 November 2024, Győr, Hungary Proceedings / auth. Salah Rnin [et al.] // 2nd Conference on Sustainability – COS '24. - Győr : [s.n.]. - pp. 46-54.

Towards building information modelling for existing structures [Journal] / auth. Arayici Yusuf. - 2008. - p. 13.

UAV applications in intelligent traffic: RGBT image feature registration and complementary perception [Journal] / auth. Ji Yingying [et al.] // Advanced Engineering Informatics. - Gennaio 2025. - 102953 : Vol. 63. - p. 13.

Unveiling IFC2x4 – The Next Generation of openBIM [Conference] / auth. Liebich Thomas // Proceedings of the CIB W78 2010: 27th International Conference. - Cairo : buildingSMART International, 2010. - p. 8.

UNVEILING IFC2X4 - THE NEXT GENERATION OF OPENBIM [Journal] / auth. Liebich Thomas . - 2010. - p. 8.

Using Dynamo for Automatic Reconstruction of BIM Elements from Point Clouds [Journal] / auth. Rocha Gustavo and Luís Mateus // Applied Sciences. - 2024. - 4078 : Vol. 14. - p. 41.

VPL geometry processing for open multilevel and multiscalar databases [Journal] / auth. Lanzara Emanuela [et al.] // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences / ed. 8th International ISPRS Workshop LowCost 3D - Sensors Algorithms, Applications, 12–13 December 2024. - Brescia : [s.n.], Dicembre 2024. - 2/W8-2024 : Vol. Volume XLVIII. - pp. 273-280.