

Scan to HBIM:

Documentazione 3D della Director's House
presso la University of California San Diego



**Politecnico
di Torino**

Corso di Laurea Magistrale in Architettura Costruzione e Città
A.A. 2025/2026
Sessione di Laurea dicembre 2025

Candidato
Enrico Rocca

Relatore
Prof. Fliberto Chiabrando

Correlatori
Dr. Dominique Rissolo
Scott McAvoy

Abstract

La tesi documenta e interpreta, con metodologie integrate di geomatica e HBIM, la Director's House (T-16) presso la Scripps Institution of Oceanography (SIO) nel campus della University of California San Diego (UCSD). Un inquadramento territoriale e storico introduce il rapporto di lunga durata tra la Scripps, dalle origini del Novecento, e la nascita di UC San Diego, delineando il passaggio da colonia scientifica costiera a polo accademico di rilevanza internazionale. Il lavoro è stato sviluppato nell'ambito del programma Erasmus in collaborazione con la University of California San Diego e con il laboratorio di ricerca CHEI (Cultural Heritage Engineering Initiative), dove sono state condotte le attività di rilievo, analisi e sperimentazione digitale.

La Director's House, assunta come caso studio, è un bungalow californiano in legno di sequoia: già residenza dei direttori e poi convertita a usi amministrativi, concentra valori architettonici, storici e identitari. L'obiettivo di questa tesi è definire un workflow replicabile per la documentazione metrica e informativa di beni del patrimonio recente, capace di coniugare accuratezza geometrica, qualità cromatica e interoperabilità verso ambienti BIM/HBIM, a supporto della conservazione.

Le acquisizioni integrano rilievo LiDAR terrestre (Leica RTC360), fotogrammetria a immagine (Sony A7R III) e mobile mapping fotogrammetrico (Looq AI), con georeferenziazione GNSS su punti di controllo progettati secondo le linee guida ASPRS. La pipeline di elaborazione comprende la registrazione e la pulizia delle nuvole di punti, la loro integrazione e la gestione dei dataset attraverso software dedicati: CloudCompare per l'allineamento e la verifica metrica, Agisoft Metashape per la generazione di nuvole e mesh texturizzate, e Potree per la visualizzazione interattiva e la condivisione online.

Dalla nuvola consolidata si passa alla modellazione HBIM: ottimizzazione in ReCap, importazione in Revit e strutturazione informativa. Il risultato è un modello HBIM georeferenziato, utilizzabile per analisi, pianificazione manutentiva e comunicazione, oltre che come prototipo metodologico trasferibile ad altri casi di patrimonio.

Indice

6 *Inquadramento territoriale*

- 7 1.1 La città di San Diego
- 8 1.2 Dalla Scripps Institution of Oceanography alla UC San Diego
- 9 1.3 Origini e sviluppo della Scripps Institution of Oceanography

16 *Director's House (T-16)*

- 17 2.1 Storia e contesto
- 19 2.2 Trasformazioni e restauri
- 23 2.3 I direttori residenti
- 26 2.4 Elementi esterni e valore simbolico

28 *Metodi e tecniche di rilievo*

- 29 3.1 Introduzione
- 31 3.2 La topografia
 - 3.2.1 Stazione Totale
 - 3.2.2 Sistemi GNSS (Global Navigation Satellite System)
 - 3.2.3 Georeferenziazione e Ground Control Points (GCPs)
 - 3.2.4 Linee guida ASPRS
- 39 3.3 Tecniche LiDAR
 - 3.3.1 Laser scanner terrestri
- 42 3.4 Sistemi di Mobile Mapping e algoritmi
- 44 3.5 Looq AI
 - 3.5.1 Principio di funzionamento
 - 3.5.2 Perché “AI”: il ruolo dell’intelligenza artificiale

	3.5.3 Differenze rispetto ai sistemi SLAM
	3.5.4 Accuratezza e prestazioni
48	3.6 Fotogrammetria
	3.6.1 I principi della fotogrammetria
	3.6.2 Calibrazione delle camere e orientamento delle immagini
	3.6.3 Acquisizione dei dati fotogrammetrici
58	3.7 Structure from Motion (SfM)
	3.7.1 Vantaggi SfM

62 *Il rilievo metrico della Director's House*

63	4.1 Acquisizione dei dati
65	4.2 Rilievo LiDAR terrestre (Leica RTC360)
67	4.3 Looq AI
69	4.4 Acquisizione dati GNSS
73	4.5 Elaborazione dati RTC360
77	4.6 Elaborazione e gestione delle nuvole di punti
87	4.7 Risultati e confronto tra dataset

92 *BIM & HBIM*

93	5.1 Introduzione al BIM
95	5.2 Alcuni cenni storici
98	5.3 Le 10 dimensioni del BIM
101	5.4 Modellazione parametrica
103	5.5 L'approccio sinergico
	5.5.1 Interoperabilità e gestione dei flussi informativi
	5.5.2 Standard IFC
108	5.6 Modellazione BIM
111	5.7 CAD e BIM a confronto
	5.7.1 La curva di McLeamy

I 14	5.8 Normativa
	5.8.1 Livelli di dettaglio: LOD, LOG, LOI, LOIN
I 19	5.9 Heritage Building Information Modeling

I 24 *Modellazione HBIM Director's House*

I 25	6.1 Autodesk Recap Pro
I 26	6.2 Autodesk Revit
	6.2.1 Modellazione porte
	6.2.2 Modellazione Finestre
	6.2.3 Altre modellazioni
	6.2.4 Integrazione delle informazioni nel modello HBIM
I 53	6.3 Verifica accuratezza del modello HBIM

I 59 *Elaborati grafici*

I 66 *Conclusioni*

I 70 *Bibliografia*

STREET MAP CITY OF SAN DIEGO AND VICINITY

Inquadramento territoriale

LEGEND
— PAVED HIGHWAYS & ROADS (SINGLE TRACKS)
— UNPAVED STREETS & ROADS
— GRAVEL NATIONAL STREETS & ROADS
LOCATION MAP
UNITED STATES GOVERNMENT
HOUSING PROJECTS
SAN DIEGO AREA

Figura 1 - 1948 - San Diego City Map with Federal Housing Project Locations (Special Collections & Archives, University of California San Diego)

1.1 La città di San Diego

San Diego è una delle principali città della California meridionale, posta lungo la costa dell'Oceano Pacifico, a ridosso del confine con il Messico. Capoluogo dell'omonima contea, conta oggi oltre un milione e trecentomila abitanti, risultando la seconda città dello Stato per popolazione dopo Los Angeles e l'ottava degli Stati Uniti¹.

Il suo territorio presenta una lunga fascia costiera con spiagge sabbiose e scogliere, un entroterra caratterizzato da dolci colline e, più a est, le catene montuose che preludono al deserto del Colorado. Confina a nord con la contea di Orange County, a est con la contea di Imperial, a sud con la città messicana di Tijuana, mentre a ovest è naturalmente delimitata dall'Oceano Pacifico.

Il clima di San Diego è di tipo mediterraneo, con influssi semidesertici: le temperature sono miti per gran parte dell'anno, con inverni poco piovosi ed estati calde ma mitigate dalle brezze oceaniche. Questo equilibrio climatico ha favorito non solo la crescita turistica ma anche lo sviluppo residenziale, rendendola una delle città più attrattive della California.

Dal punto di vista storico, San Diego è considerata la culla della presenza europea sulla costa occidentale degli Stati Uniti. Fu infatti nel 1769 che i coloni spagnoli vi fondarono il Presidio militare e la Missione di San Diego de Alcalá, primo insediamento stabile in Alta California. Dopo l'annessione della California agli Stati Uniti (1848), la città conobbe un rapido sviluppo grazie alla sua posizione strategica come porto naturale, diventando un punto di riferimento per i traffici marittimi e, in seguito, sede di importanti basi militari.

Oggi San Diego unisce la sua tradizione storica con un'economia fortemente diversificata, che spazia dalla difesa alla biotecnologia, dal turismo alla ricerca scientifica. La presenza della University of California, San Diego (UCSD) e dello storico Scripps Institution of Oceanography (SIO) contribuisce a consolidare il ruolo della città come polo accademico e scientifico di rilevanza internazionale¹.

¹City of San Diego (<https://www.sandiego.gov/planning/programs/historical>)

1.2 Dalla Scripps Institution of Oceanography alla UC San Diego

All'estremo sud della California, dove la scogliera di La Jolla incontra l'Oceano Pacifico, una piccola stazione biologica nata nei primi anni del Novecento ha innescato un processo di lunga durata capace di trasformare un avamposto di ricerca in uno degli ecosistemi accademici più vitali e riconosciuti a livello internazionale. La Scripps Institution of Oceanography (SIO), concepita in origine come laboratorio stagionale e poi radicata stabilmente in riva al mare, ha contribuito in modo decisivo a definire la cultura scientifica e l'identità urbana della costa di San Diego. Attorno a quel nucleo, nel 1960 è stato istituito il campus della University of California San Diego: da quel momento l'università ha incorporato, potenziato e proiettato a scala globale la tradizione di ricerca avviata alla Scripps. Le due storie sono strettamente intrecciate; comprendere UC San Diego significa, in sostanza, ripercorrere la genealogia della Scripps e riconoscere come la sua impronta metodologica abbia informato l'assetto disciplinare e l'orientamento strategico dell'intero ateneo².



Figura 2 - Foto aerea di Scripps Institution of Oceanography, 1912 (fonte: Scripps Institution of Oceanography, UC San Diego)

1.3 Origini e sviluppo di Scripps Institution of Oceanography

Le origini dell'istituto si legano alla figura di William Emerson Ritter, zoologo dell'Università della California a Berkeley, che tra la fine dell'Ottocento e i primi anni del Novecento organizzò campagne estive lungo la costa pacifica con l'obiettivo, allora innovativo, di passare da raccolte occasionali a uno studio continuativo in una stazione marittima permanente. Nella visione di Ritter, l'osservazione biologica doveva convivere con misure fisiche e chimiche dell'ambiente, così da restituire un quadro integrato dei processi marini.



Figura 3 - William Ritter nel laboratorio di Coronado, 1904 (fonte: Explorations, Scripps Institution of Oceanography, 2003)

La California meridionale offriva le condizioni ideali: un clima temperato privo di estremi, un mosaico di habitat che spaziava dalle baie riparate alle praterie di kelp, dalle scogliere alle spiagge sabbiose, e una comunità civica sensibile alle iniziative di progresso. Fu determinante

l'incontro con la famiglia Scripps, e in particolare con Ellen Browning Scripps ed Edward Willis Scripps, i cui sostegni economici e la cui capacità di mobilitare consenso permisero il salto di scala dall'idea al cantiere operativo. Nel 1903 nacque così la Marine Biological Association of San Diego. La prima sede, ricavata nella rimessa delle barche dell'Hotel del Coronado, rappresentò il passaggio dalla "scienza in tenda" a un'istituzione riconoscibile, dotata di obiettivi e strumenti.

Nel giro di pochi anni la stazione si trasferì a La Jolla Cove, dove trovò spazio per strutture più idonee e una relazione più stretta con il fronte mare. Nel 1907 fu acquisito, a prezzo calmierato dall'amministrazione cittadina, un più ampio appezzamento costiero a nord della Cove; qui, nel 1910, si inaugurò il George H. Scripps Memorial Marine Biological Laboratory, progettato da Irving Gill. L'edificio, sobrio e luminoso, sfruttava lucernari, mattoni di vetro e ampie finestrate per portare luce naturale su microscopi, acquari e strumentazioni ottiche, in un dialogo calibrato con l'orizzonte marino e con le esigenze dei ricercatori. Quel laboratorio, oggi conosciuto come Old Scripps Building, divenne il fulcro di una piccola colonia scientifica in crescita: attorno sorsero cottage essenzialmente in legno, una casa del direttore pensata come luogo di residenza e di scambio culturale, e, poco dopo, un molo proteso nel mare per facilitare osservazioni e imbarchi. Nel 1912 la Scripps entrò formalmente a far parte dell'University of California, assumendo il nome di Scripps Institution for Biological Research; si sanciva così, anche sul piano amministrativo, la stabilità dell'istituto e la sua missione pubblica in favore della ricerca e della formazione³.

Tra gli anni Dieci e Venti la stazione cambiò pelle, evolvendo da presidio centrato sulla biologia marina a vera e propria istituzione oceanografica. L'interesse si spostò gradualmente dai soli organismi all'ambiente che li ospita: si misuravano temperatura, salinità e densità delle acque; si raccoglieva e catalogava il plancton con reti dedicate; si correlavano i dati biologici con quelli fisici e chimici, consolidando quell'approccio sistemico che Ritter aveva teorizzato e che la pratica di laboratorio e di mare andava via via affinando. In parallelo si irrobustì l'infrastruttura tecnica. La piccola flotta, passata dalla goletta Laura allo yacht Loma, culminò nel varo dell'Alexander Agassiz, tra le prime navi statunitensi progettate specificamente per la ricerca; il molo in legno, completato nel 1916, offrì una

piattaforma stabile per misure continue e imbarco; le abitazioni spartane per ricercatori e famiglie conferirono all'insediamento l'aspetto di una sobria company town del sapere; la casa del direttore, realizzata nel 1913 in legno di sequoia, funzionò anche come spazio di ospitalità per studiosi e personalità in visita. Nel 1924 la direzione passò al geologo Thomas Wayland Vaughan, che consolidò l'indirizzo oceanografico estendendo la ricerca ai sedimenti, alla chimica e alla batteriologia marina e all'idrografia costiera. La denominazione si adeguò coerentemente a tale evoluzione e l'istituto assunse stabilmente il nome di Scripps Institution of Oceanography, trovando collocazione nella rete internazionale, ancora in formazione, delle scienze del mare.

Con l'arrivo di Harald U. Sverdrup alla direzione nel 1936, l'oceanografia praticata a La Jolla assunse una fisionomia dichiaratamente processuale, concentrata sulla modellazione e sulla previsione. Durante la Seconda guerra mondiale la Scripps fu coinvolta in attività cruciali per lo sforzo alleato. Sverdrup, insieme al giovane Walter Munk, sviluppò metodologie per prevedere il moto ondoso e i frangenti, applicate agli sbarchi anfibi in Nord Africa e in Normandia, e coordinò lavori su acustica subacquea e sonar; nel frattempo



Figura 4 – Molo in costruzione, 1916 (fonte: archivio fotografico della Director's House)

venivano perfezionate le letture del profilo termico della colonna d'acqua mediante bathythermograph per rendere più efficace il tracciamento dei sommergibili. Quella stagione “militare” lasciò un duplice lascito: da un lato la formalizzazione di tecniche di analisi — serie temporali, statistiche, modelli — poi divenute standard nella ricerca; dall'altro una rete di relazioni con la Marina, con laboratori federali e con l'industria che, nel dopoguerra, accelerò il salto di qualità dell'istituto.

Il clima del secondo dopoguerra, caratterizzato da nuove risorse e da una forte fiducia nell'innovazione, aprì quella che Roger Revelle avrebbe definito la “grande età dell'esplorazione”. Revelle, dapprima direttore associato e poi direttore, guidò l'istituto in spedizioni che ampliarono il teatro di misura nel Pacifico centrale e meridionale. La *MidPac* del 1950 e la *Capricorn* del 1952 produssero risultati che rovesciarono l'immagine tradizionale del fondo oceanico, rivelando un paesaggio giovane e montuoso segnato da dorsali medio-oceaniche e da fosse profonde. La scarsa presenza di sedimenti in queste ultime e le anomalie di flusso di calore suggerirono processi di rinnovamento della litosfera, che avrebbero condotto, attraverso contributi successivi, alla formulazione matura della tettonica a placche. In parallelo, Revelle colse con lucidità la portata climatica dell'oceano e, nel 1956, coinvolse Charles David Keeling in un programma di misure continue della concentrazione atmosferica di CO₂. La sequenza di dati che ne scaturì, la celebre Keeling Curve, è tuttora una delle evidenze più autorevoli del dibattito sul cambiamento climatico⁴.

La massa critica di competenze, infrastrutture e prestigio maturata a La Jolla convinse il Board of Regents della University of California ad istituire un nuovo campus. Nel 1960 nacque UC San Diego, e la Scripps ne costituì il pilastro fondativo, trasmettendo all'università un'impronta metodologica basata sull'interdisciplinarietà, sull'organizzazione per progetti complessi e sulla connessione con reti nazionali e internazionali. Nel frattempo, l'istituto oceanografico ampliava il raggio d'azione: dall'oceanografia fisica, chimica e biologica alla geologia e geofisica marina; dalle scienze dell'atmosfera e del clima al telerilevamento e alle osservazioni da satellite, che segnarono nel 1979 l'ingresso nell'era spaziale dell'oceanografia; dalla dinamica costiera all'analisi degli impatti antropici e allo

sviluppo di soluzioni per la sostenibilità. In questo arco di decenni si consolidò anche la proiezione pubblica della Scripps: la divulgazione trova un presidio nell'apertura del Birch Aquarium nel 1992, mentre la formazione di tecnici e decisori e il supporto scientifico alle politiche ambientali ne rafforzano il ruolo di interfaccia tra ricerca e società. Nel suo insieme, l'istituto si propone come un hub in cui esplorazione, misurazione e responsabilità civile convergono.

La materialità della Scripps — fatta di architetture, strumenti e paesaggio — racconta, al di là dei documenti, la sua identità. L'Old Scripps Building, con il disegno razionale e la luce naturale diffusa, è al tempo stesso monumento storico e memoria tangibile della stagione pionieristica; la casa del direttore, un volume semplice in legno di sequoia affacciato sul mare, ha funzionato a lungo come residenza e luogo di ospitalità scientifica; il molo, costruito nel 1916 e successivamente ricostruito in cemento, è la piattaforma da cui dipartono campionamenti, misure e attività didattiche; la flotta, dall'Alexander Agassiz alla goletta E.W. Scripps e alle unità moderne, è l'estensione mobile del laboratorio; attorno a questi elementi si è formato un paesaggio della ricerca in cui residenze, aule e officine convivono con pontili, vasche e sensori, restituendo l'immagine di un campus poroso, attraversato quotidianamente da studenti, tecnici e ricercatori⁵.



Figura 5 - William Ritter accompagnato dal suo gruppo di lavoro, 1905 (fonte: Scripps Institution of Oceanography, UC San Diego)

⁵Ibidem

UC San Diego ha ereditato e rimodulato questa vocazione, facendone la propria cifra distintiva. Il campus, disteso tra l'altopiano di Torrey Pines e il Pacifico, è organizzato in college residenziali che bilanciano la scala di una grande università con la prossimità di comunità accademiche più raccolte, dotate di identità e servizi propri. L'ateneo si è affermato in aree quali biomedicina e biotecnologie, neuroscienze, informatica e ingegneria, fisica e scienze ambientali; ospita il San Diego Supercomputer Center e una costellazione di istituti interdisciplinari che rispecchiano la tradizione integrata inaugurata alla Scripps. L'architettura dialoga con il paesaggio costiero, contribuendo a una forte riconoscibilità visiva: la Geisel Library, progettata da William Pereira nel 1970, è divenuta un'icona urbana; la Stuart Collection dissemina nel campus opere artistiche che trasformano percorsi e spazi aperti in un museo all'aria aperta. Il legame con la città è stretto e reciproco: UC San Diego alimenta il distretto dell'innovazione di Torrey Pines, intreccia collaborazioni con ospedali e centri clinici, con startup e grandi imprese, e influisce sull'organizzazione della mobilità, sull'offerta residenziale e sui servizi della regione. Rimane evidente l'impronta della Scripps: centralità dell'osservazione, approccio interdisciplinare e costante attenzione ai temi ambientali e climatici⁶.

Dalla tenda sul molo alla flotta oceanografica, la traiettoria che conduce dalla Scripps a UC San Diego mostra come la ricerca possa trasformare un luogo in un paesaggio della conoscenza. La Scripps ha fornito all'università non solo il terreno fisico su cui insediarsi, ma soprattutto un metodo: osservazione di lungo periodo, infrastrutture condivise, apertura alla città e pratica sistematica dell'interdisciplinarietà. UC San Diego, a sua volta, ha messo a disposizione massa critica, reti e piattaforme per amplificare la portata della ricerca a scale sempre più estese. Insieme, le due istituzioni hanno costruito uno dei poli scientifici più autorevoli per lo studio integrato di oceano, atmosfera e società, con una ricaduta concreta in termini di innovazione, cultura e sostenibilità per l'intera regione di San Diego e ben oltre i suoi confini.

Linea del tempo SIO e occupanti Director's House

1903 – William E. Ritter (UC Berkeley) avvia a San Diego una stazione marittima stagionale con il sostegno di Ellen B. ed E.W. Scripps.

1905 – Trasferimento a La Jolla Cove; avvio del “Little Green Lab”.

1907 – Varata l'Alexander Agassiz, tra le prime navi USA progettate per la ricerca.

1910 – Inaugurazione del George H. Scripps Memorial Laboratory (Irving Gill).

1912 – Scripps Institution for Biological Research.

1913-1923 – Direzione a Dr. e Mrs. William Ritter.

1924-1936 – Direzione a Dr. e Mrs. Thomas Wayland Vaughan con la figlia Caroline;

1936-1948 – Direzione a Dr. e Mrs. Harald U. Sverdrup con la figlia Anna.

1943-44 – Con Walter Munk sviluppa metodi di previsione delle onde usati negli sbarchi alleati.

1948-1954 – Occupazione di Dr. e Mrs. Carl L. Hubbs.

1948 – Rientra Roger Revelle; inizia l'età dell'esplorazione.

1954-1964 - Occupazione U.S. Fish e Wildlife Service.

1956 – Charles D. Keeling avvia le misurazioni continue della CO₂ atmosferica.

1960 – Istituzione del campus UC San Diego con SIO come nucleo fondativo.

1965-1966 (data di fine incerta) – Occupazione Sea Lab II.

1966-1970 – Occupazione Deep Sea Drilling Program.

1970/1971- (data di fine incerta) – Center for Marine Affairs. (Frautschy il 16/02/93 disse che CMA e Sea Grant si sovrapponevano nell'edificio.

1975-2017 – occupazione Sea Grant Program.

2017-oggi – Spazio comune per incontri istituzionali e attività collaborative SIO⁷.

⁷Occupants of T-16 Director's House, Special Collection & Archives, UC San Diego Library

Director's House (T-16)

SCRIPPS INSTITUTION
OF OCEANOGRAPHY

Built by William & Mary Ritter
1913



Walk this path and share
Joseph Jaffe's love of the sea

Figura 6 - targa storica (fonte: fotografia personale, maggio 2025)

2.1 Storia e contesto

All'interno del campus della Scripps Institution of Oceanography (SIO) di La Jolla, oggi parte integrante della University of California San Diego (UCSD), sorge un edificio che custodisce una storia unica: la Director's House, indicata nei documenti come T-16.



Figura 7 - Director's House, 1913 (fonte: archivio fotografico della Director's House)

La ricostruzione storica dell'edificio è stata resa possibile grazie alla consultazione dei documenti conservati presso la Geisel Library della UC San Diego⁸.

Costruita nel 1913, questa residenza rappresenta uno dei primi edifici abitativi stabili del campus e fu dimora dei primi tre direttori dell'istituto. La sua posizione, lungo La Jolla Shores Drive, e la sua natura di bungalow californiano in legno di sequoia le conferiscono un valore tanto architettonico quanto simbolico: essa racconta la trasformazione di Scripps da colonia scientifica isolata a centro di ricerca di rilevanza mondiale.

La decisione di erigere una residenza per il direttore maturò nel 1913, quando la stazione stava crescendo rapidamente. L'Old Scripps Building non poteva più ospitare spazi di ricerca e al contempo alloggi per il direttore. Un comitato composto da Ellen Browning Scripps e da Mary Bennett Ritter fu incaricato di seguire il progetto: ad agosto furono stanziati 4.000 dollari, somma considerevole per l'epoca⁸.

⁸Special Collection & Archives, UC San Diego Library

Mary Ritter, medico, attivista sociale e moglie del direttore, ebbe un ruolo decisivo: secondo la sua autobiografia, disegnò personalmente i piani e supervisionò il cantiere, adattando schemi di progetto elaborati dall'amica architetta Julia Morgan. I lavori furono condotti dal capomastro John Morgan e si conclusero entro dicembre dello stesso anno.

La T-16 era una "spaziosa casa a due piani con otto stanze", impostata su fondazioni in calcestruzzo (1600 piedi quadrati) e con una superficie utile di circa 3500 piedi quadrati⁹. Lo stile era quello del California bungalow, caratterizzato da sobrietà, semplicità costruttiva e forte relazione con il paesaggio circostante. Le scandole esterne, dipinte nel tempo di bianco o marrone scuro, testimoniavano un linguaggio architettonico essenziale, in contrasto con la monumentalità del vicino laboratorio di Irving Gill.

2.2 Trasformazioni e restauri

La Director's House, pur mantenendo un aspetto riconoscibile, è stata oggetto di numerosi interventi che ne hanno segnato la storia. Durante il periodo dei Ritter (1913–1923) la casa conservò il suo assetto originario, ma fu arricchita dalle sistemazioni verdi curate da Mary Ritter, che creò un piccolo giardino insieme a Kate Sessions. Con l'arrivo dei Vaughan, nel 1924, si rese necessario il rifacimento della copertura, e poco prima del 1925 venne aggiunto un nuovo bagno, al piano superiore in prossimità della stanza degli ospiti, per rispondere alle esigenze di una residenza sempre più frequentata da ospiti e accademici.

Un altro momento importante fu il 1936, quando Harald Sverdrup dispose l'installazione di una caldaia a gas per dotare la casa di un sistema di riscaldamento centralizzato, adeguandola a standard di comfort più elevati. L'anno successivo, nel 1937, venne condotta una revisione generale delle residenze Scripps e, in tale occasione, furono redatti i primi disegni quotati della T-16, che ancora oggi costituiscono una fonte archivistica di grande valore.

Durante l'occupazione dei coniugi Hubbs, tra il 1948 e il 1954, la casa non subì grandi trasformazioni ma venne mantenuta in buone condizioni abitative. Con la successiva conversione a uffici, iniziata nel 1954 con l'insediamento dell'U.S. Fish & Wildlife Service, la T-16 subì modifiche più incisive: la cucina venne trasformata a uso ufficio, il soggiorno al piano terra parzialmente riconfigurato come sala riunioni e gli spazi interni adattati a esigenze funzionali.

Negli anni Sessanta e Settanta, in concomitanza con i programmi Sea Lab II e Deep Sea Drilling Program, si registrarono le modifiche più significative: venne aggiunta una scala esterna di sicurezza per l'accesso al secondo piano, il camino della sala da pranzo fu rimosso, fu costruito un garage e sul lato est fu aperta una nuova finestra che, secondo valutazioni successive, avrebbe contribuito a indebolire la struttura in termini sismici. Con l'arrivo del Center for Marine Affairs, la sala conferenze al piano terra venne temporaneamente suddivisa e poi ripristinata, mentre dal 1975 fino al 2017 la T-16 divenne la sede

stabile del California Sea Grant Program, durante il quale l'edificio venne periodicamente ridipinto nelle sue scandole esterne, alternando le finiture bianche e marrone scuro.

Infine, a partire dal 1989, il Comitato per il Patrimonio dello Scripps avviò un processo di riflessione per il riconoscimento della T-16 come edificio storicamente significativo. Tra il 1989 e il 1993 furono proposte azioni di restauro mirate a riportare la casa all'aspetto originario del 1913, compatibilmente con le necessità di sicurezza antisismica e antincendio, e a preservare gli elementi di contesto, come la scultura *The Ploughman* collocata sul prato antistante, insieme al camino e al patio in mattoni realizzati da Sverdrup.



Figura 8 - Costruzione del molo con Director's House sullo sfondo, 1915 (fonte: archivio fotografico della Director's House)

Director's House (T-16) - Trasformazione e restauri

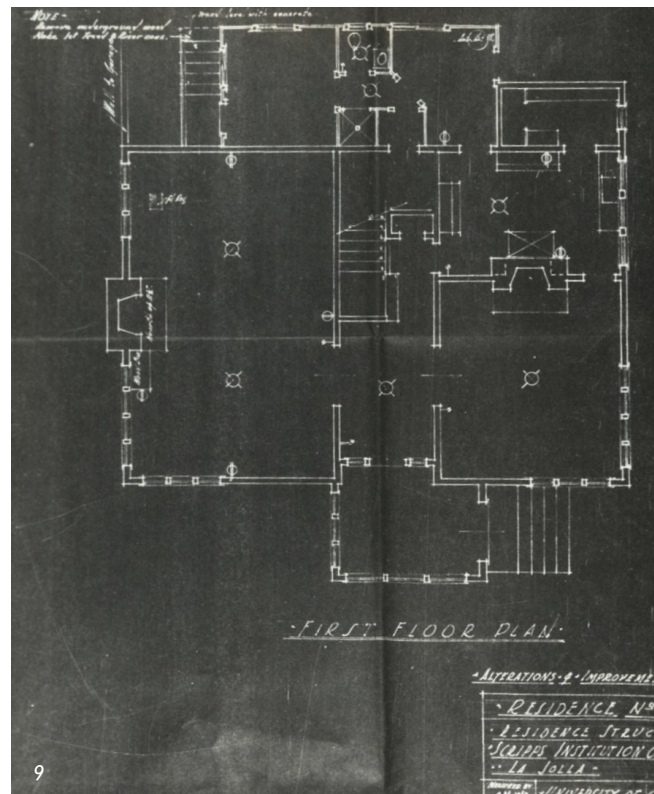
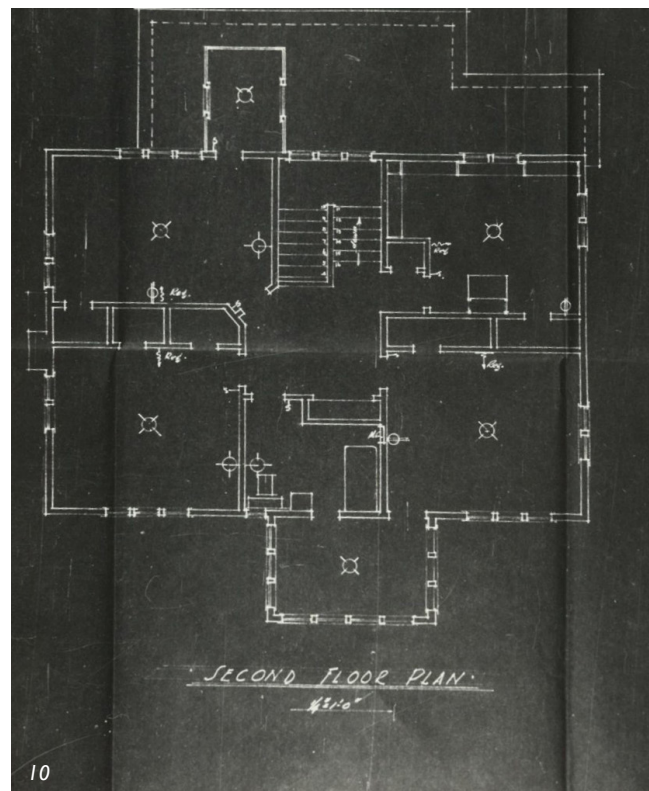


Figura 9, 10 - Planimetrie Director's House, 1913 (fonte: Special Collections & Archives, University of California San Diego)



Director's House (T-16) - Trasformazione e restauri



Figura 11 - Director's House, 1950 (fonte: Special Collections & Archives, University of California San Diego)



Figura 12 – Director's House, maggio 1998 (fonte: fotografia di Georgia Ratcliffe, Special Collections & Archives, University of California San Diego)



Figura 13: Director's House, aprile 2025 (fonte: fotografia personale)

2.3 I direttori residenti

La T-16 non fu solo un'abitazione, ma un vero spazio di socialità e rappresentanza accademica, dove le scelte e i caratteri dei diversi direttori e delle loro famiglie lasciarono un'impronta tangibile.

William e Mary Bennett Ritter (1913–1923)

I primi a risiedere nella casa furono i Ritter. William, zoologo e fondatore dell'istituto, necessitava di liberare l'Old Scripps per funzioni scientifiche. Mary, oltre a curare la costruzione, si occupò anche della sistemazione paesaggistica con l'aiuto della celebre paesaggista Kate Sessions.

La loro vita domestica rifletteva lo spirito pionieristico della colonia scientifica: essenzialità, lavoro e forte connessione con la comunità locale. Mary proseguì le sue battaglie per i diritti delle donne e continuò a essere figura di riferimento anche all'interno del campus.



*Figura 14 – William e Mary Bennett Ritter, 1914
(fonte: archivio fotografico della Director's House)*

Wayland e Dorothy Quincy Upham Vaughan (1924–1936)

Dal 1924 la casa fu abitata da Thomas Wayland Vaughan, geologo e direttore fino al 1936. Con lui arrivò la moglie Dorothy Quincy Upham Vaughan, donna di cultura raffinata e discendente di illustri famiglie statunitensi (tra cui i Quincy, legati al presidente John

Director's House (T-16) - I direttori residenti

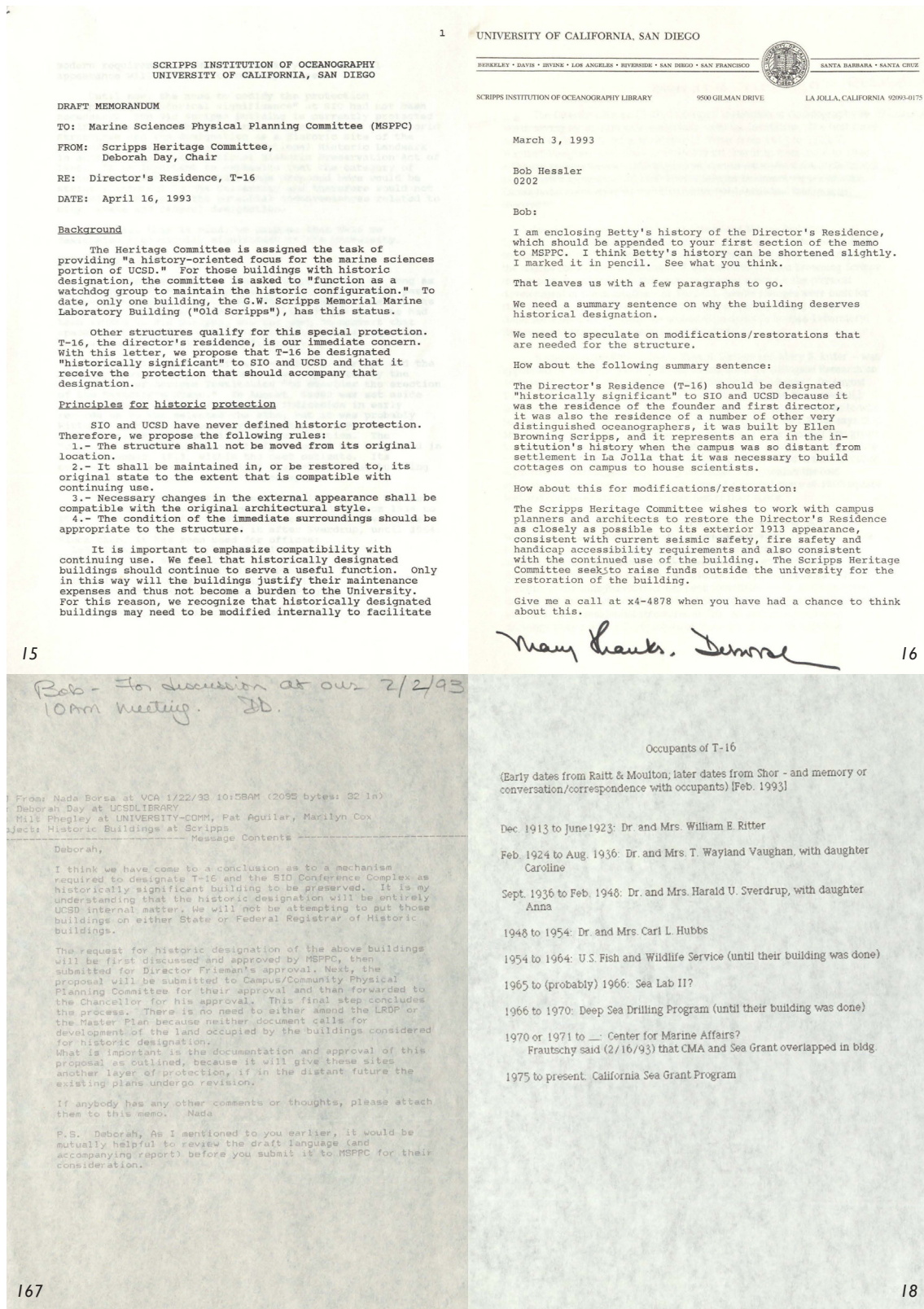


Figura 15 16, 17, 18 - Documenti d'archivio (fonte: Special Collections & Archives, University of California San Diego)

Quincy Adams, e i Wendell/Holmes).

La loro presenza portò a un cambio nello stile di vita della T-16: le cene e gli incontri sociali assunsero un tono più formale, con regole di etichetta, servitù e un ambiente culturale che elevò il prestigio della Scripps. Dorothy fu descritta come colei che diede il “tono culturale” all’ambiente della stazione, sottolineando l’importanza della casa come luogo di rappresentanza.

Harald Ulrik e Gudrun Vaumund Bronn Sverdrup (1936–1948)

Nel 1936 divenne direttore il norvegese Harald Sverdrup, scienziato ed esploratore artico, che visse nella T-16 insieme alla moglie Gudrun e alla figlia adottiva Anna.

Gudrun, appena giunta a La Jolla, ebbe una reazione intensa nel vedere la casa ridipinta di bianco: abituata al legno naturale, scoppiò in lacrime di fronte a quella che le sembrava una perdita di autenticità. Con il tempo, però, divenne una figura centrale nella comunità di Scripps, impegnandosi a migliorare le condizioni abitative del campus.

Gli anni di Sverdrup furono cruciali: sotto la sua guida Scripps divenne un istituto di portata internazionale, soprattutto durante la Seconda guerra mondiale. La casa continuò a essere punto di incontro tra vita privata e rapporti scientifici.

Occupanti Carl e Laura Hubbs (1948–1954)

Dopo Sverdrup, i direttori successivi preferirono non abitare più nella T-16. La casa fu occupata dal biologo Carl Hubbs e da sua moglie Laura, fino al 1954. Questa fu l’ultima fase residenziale prima della trasformazione definitiva in uffici¹⁰.



Figura 19: Gudrun Vaumund Bronn Sverdrup
(fonte: archivio fotografico della Director's House)



Figura 20: Dorothy Quincy Upham Vaughan
(fonte: archivio fotografico della Director's House)

¹⁰Special Collection & Archives, UC San Diego Library

2.4 Elementi esterni e valore simbolico

Nel giardino a est della Director's House si trova una scultura in bronzo raffigurante un contadino seduto pensosamente sul proprio aratro, con un piccolo cane ai suoi piedi. *The Ploughman* fu realizzata nel 1910 dallo scultore Arthur Putnam, come parte di una serie commissionata da E.W. Scripps per rappresentare la storia della California. Secondo i membri della famiglia Scripps, la scultura fu modellata sulla figura di George Henry Scripps, fratello minore di Ellen Browning Scripps, che lo ritrae mentre riflette sull'opportunità di vendere le sue fattorie per contribuire al sostegno della nascente catena di giornali della famiglia Scripps¹¹.

La Director's House rappresenta una memoria vivente della Scripps Institution of Oceanography. Fu dimora dei fondatori, luogo di incontro e di socialità, testimone di epoche diverse e specchio dei cambiamenti che hanno trasformato l'istituto.

Il suo valore non risiede solo nelle caratteristiche architettoniche, ma nel ruolo che ebbe nel plasmare l'identità della comunità scientifica di Scripps. Le figure di Mary Ritter, Dorothy Vaughan e Gudrun Sverdrup mostrano come questa casa sia stata anche uno spazio in cui le donne contribuirono a definire l'ambiente culturale e sociale dell'istituto.

La designazione proposta negli anni Novanta come edificio "storicamente significativo" conferma la volontà di preservarne non solo la materialità, ma anche il patrimonio di memorie e valori che custodisce.



Figura 21: *The Ploughman*
(fonte: fotografia personale, , maggio 2025)

Metodi e tecniche di rilievo



Figura 22: Director's House (fonte: fotografia personale, giugno 2025)

3.1 Introduzione

Negli ultimi decenni il rilievo architettonico ha conosciuto una trasformazione radicale grazie all'introduzione di tecnologie digitali avanzate. L'impiego di metodologie 3D è riuscito a sostituire il rilievo tramite strumenti manuali utilizzato in passato, consentendo di raggiungere un livello di precisione e accuratezza di alto livello.

Queste tecniche con il passare del tempo sono diventate strumenti imprescindibili, non solo per la ricerca, ma anche per la progettazione, conservazione e valorizzazione del patrimonio architettonico e culturale come nel nostro caso. Integrandole al metodo tradizionale si offrono quindi nuove possibilità di analisi e archiviazione.

Un punto fondamentale è la capacità di documentare con estrema accuratezza geometrie complesse e dettagli superficiali che permettono di acquisire il maggior numero di informazioni essenziali per interventi di restauro, manutenzione o semplicemente per documentazione.

È chiaro che questo passaggio nella storia ha dovuto seguire un cambiamento graduale. Il primo tentativo fu introdotto con la fotogrammetria analogica, nella seconda metà dell'Ottocento, che cercò di integrare la fotografia nei processi di documentazione metrica. Successivamente, qualche anno più tardi, con la fotogrammetria analitica, le immagini vennero elaborate attraverso modelli matematici che riuscirono ad aumentare la precisione e la conseguente riduzione degli errori sistematici.

L'arrivo degli anni Novanta portò con sé l'introduzione della fotogrammetria digitale che ha reso possibile l'elaborazione di immagini in formato numerico, aprendo la strada a processi di calcolo sempre più automatizzati.

Le tecniche di rilievo 3D assumono un ruolo rilevante nel settore di conservazione del patrimonio e dei beni culturali.

Oltre a documentare lo stato di conservazione di un bene permettono quindi di:

- documentare in maniera esaustiva lo stato di conservazione di un bene;
- registrare dettagli architettonici e decorativi difficilmente rilevabili con strumenti tradizionali;

- predisporre archivi digitali accessibili e aggiornabili nel tempo;
- supportare decisioni progettuali fondate su dati metrici oggettivi;
- facilitare la condivisione dei dati con la comunità scientifica, enti di tutela e cittadini, tramite piattaforme open-source.

3.2 La topografia

La topografia costituisce il fondamento di ogni operazione di rilievo tridimensionale, poiché consente di determinare con precisione la posizione di punti e oggetti nello spazio, organizzandoli all'interno di un sistema di riferimento metrico e georeferenziato. In ambito architettonico e nella conservazione del patrimonio, essa rappresenta la fase preliminare su cui si innestano le tecniche più avanzate, come la fotogrammetria digitale o le scansioni laser, garantendo coerenza spaziale e continuità tra dataset provenienti da strumenti differenti, nonché la loro integrazione in ambienti informativi come l'HBIM.

Un rilievo topografico si fonda sulla definizione di una rete di punti noti che costituiscono l'ossatura del sistema di riferimento. Questa rete è generalmente articolata su tre livelli: i vertici di inquadramento, i punti di raffittimento e i punti di dettaglio. I primi sono scelti in numero ridotto ma distribuiti in modo omogeneo sull'area di interesse; misurati tramite GNSS o stazione totale, forniscono lo scheletro geometrico entro cui collocare tutte le misurazioni successive. A partire da questa rete primaria si procede poi con il raffittimento, che aumenta la densità dei punti di controllo per migliorare la copertura dell'area, fino ad arrivare al dettaglio, in cui si acquisiscono le caratteristiche specifiche dell'edificio o del sito.

La materializzazione di questi punti sul terreno avviene solitamente tramite marker fisici, come chiodi topografici o target, che assicurano la ripetibilità delle misure e fungono da riferimento per altre tecniche di rilievo. Nei progetti di fotogrammetria e laser scanning, tali punti sono utilizzati come Ground Control Points (GCPs), indispensabili per garantire la scalatura e il corretto orientamento spaziale delle nuvole di punti e dei modelli 3D.

L'inquadramento topografico assume particolare rilevanza nei contesti di conservazione e restauro. La possibilità di collegare rilievi di epoche diverse o di integrare dati acquisiti con strumenti differenti dipende infatti dalla precisione del sistema di riferimento adottato. La georeferenziazione, intesa sia in termini globali sia locali, consente di confrontare nel tempo le variazioni delle strutture, monitorarne lo stato di conservazione e

predisporre archivi digitali interoperabili.

La topografia fa da collegamento tra il rilievo geometrico e la gestione a lungo termine del patrimonio culturale. Non si limita a fornire una rappresentazione schematica del terreno, ma garantisce che le operazioni siano coerenti, riutilizzabili e comparabili trasformando i rilievi 3D in strumenti realmente utili per la tutela dei beni architettonici.

3.2.1 La stazione Totale

La stazione totale rappresenta uno degli strumenti più diffusi e affidabili nei rilievi topografici e architettonici. Nata verso la fine degli anni Settanta, ha progressivamente sostituito gli strumenti tradizionali grazie alla capacità di combinare in un unico apparato la misura di angoli e distanze. Nel tempo, l'avanzamento tecnologico ha reso questi dispositivi sempre più compatti, automatizzati e digitalizzati, consentendo non solo di acquisire i dati con elevata precisione, ma anche di registrarli ed elaborarli direttamente in formato digitale.



Figura 23: Stazione totale Leica
(fonte: Leica)

Il principio di funzionamento si basa sulla misurazione degli angoli azimutali e zenitali, insieme alla distanza inclinata che separa lo strumento dal punto osservato. Attraverso questi valori è possibile determinare con precisione le coordinate cartesiane dei punti collimati e, di conseguenza, ricostruire l'assetto metrico del terreno o dell'oggetto indagato. Nei modelli più recenti, il processo di acquisizione è supportato da software integrati e da display touch screen che semplificano le operazioni e riducono la possibilità di errore, mentre i sistemi motorizzati permettono di automatizzare i movimenti di collimazione e di registrare rapidamente un gran numero di punti.

Lo strumento è composto da tre assi, i primi due meccanici e il terzo ottico.

L'angolo azimutale è l'angolo solido formato da due piani verticali, aventi per costola la verticale passante per il punto di stazione e contenenti rispettivamente i punti tra i quali si vuole misurare l'angolo azimutale stesso.

Angolo zenitale. È l'angolo appartenente ad un piano verticale, formato dall'asse di collimazione, e dalla verticale passante per il punto di stazione¹².

Il funzionamento è basato su un principio geometrico semplice: conosciuta la posizione della stazione, la direzione del raggio emesso e la distanza misurata, è possibile ricavare le coordinate cartesiane del punto collimato. Questa procedura, ripetuta per un numero elevato di punti, permette di costruire una rete di controllo precisa e stabile. In ambito architettonico, la stazione totale è particolarmente utile per misurare elementi strutturali, sezioni di facciata, altezze di copertura e per fornire dati di riferimento ad altri rilievi più dettagliati, come quelli laser scanner o fotogrammetrici.

Un ulteriore vantaggio è dato dalla possibilità di lavorare sia in modalità con prisma, che assicura precisioni centimetrica su lunghe distanze, sia in modalità senza prisma *reflectorless*, utile per misurare punti non accessibili, come sommità di edifici o superfici non raggiungibili dall'operatore.

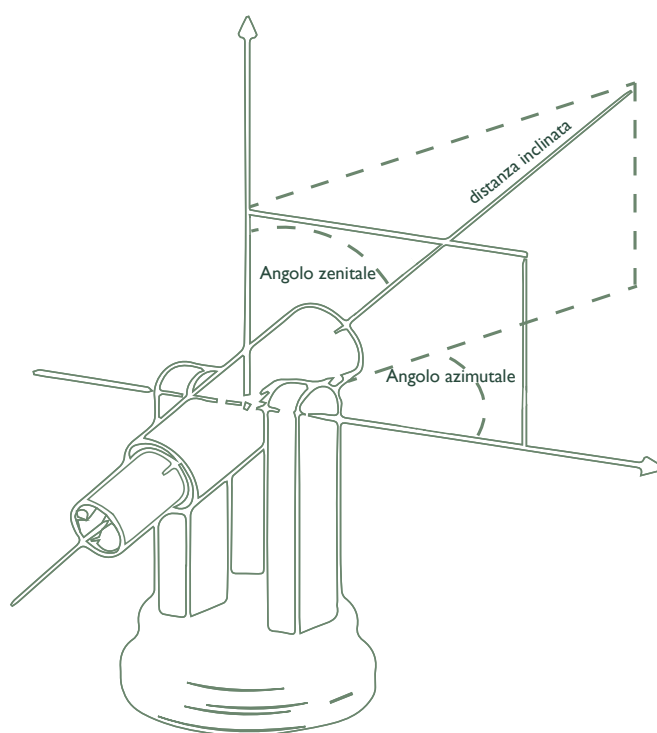


Figura 24: distanza inclinata, angolo azimutale e zenitale (rielaborazione personale)

¹²M. Roggero, Dispense del corso "Laboratorio di Geomatica per la modellazione dell'Architettura", Politecnico di Torino, a.a. 2020/2021

3.2.2 Sistemi GNSS (*Global Navigation Satellite System*)

Un ruolo centrale nel rilievo topografico contemporaneo è svolto dai sistemi GNSS, acronimo di Global Navigation Satellite System. Si tratta di tecnologie basate sull'utilizzo di costellazioni satellitari che trasmettono segnali radio, i quali vengono captati da ricevitori a terra (rovers) in grado di calcolare la posizione di un punto nello spazio con elevata accuratezza.

Il primo sistema di posizionamento satellitare operativo fu il GPS statunitense (Global Positioning System), sviluppato a partire dagli anni Settanta per scopi militari. A esso si sono progressivamente affiancate altre costellazioni, come il GLONASS della Federazione Russa, il Galileo promosso all'Unione Europea, il sistema cinese BeiDou e, in ambito regionale, l'IRNSS indiano. La coesistenza di più sistemi ha portato oggi alla possibilità di sfruttare un vero e proprio scenario multi-costellazione, che consente una copertura globale, una maggiore affidabilità e una migliore precisione anche in condizioni critiche, come aree urbane dense o contesti con parziale copertura del cielo.

Un sistema GNSS è composto da tre segmenti principali:

Il segmento spaziale è costituito dall'insieme dei satelliti in orbita, disposti a quote comprese tra i 19.000 e i 23.000 chilometri, che trasmettono in continuo segnali contenenti informazioni sulla propria posizione e sull'ora esatta.

Il segmento di controllo, situato a terra, gestisce le orbite e monitora il corretto funzionamento dei satelliti, inviando costantemente aggiornamenti e correzioni.

Infine, il segmento utente comprende tutti i ricevitori in grado di captare i segnali satellitari, elaborarli e determinare la posizione del punto rilevato.

Il principio di funzionamento si basa sulla misura del tempo impiegato da un segnale radio a viaggiare dal satellite al ricevitore a terra: conoscendo la posizione del satellite e il tempo di propagazione, è possibile calcolare la distanza e, per trilaterazione, determinare la posizione del punto rilevato. La precisione della misura varia in funzione della qualità del ricevitore, del numero di satelliti disponibili e delle correzioni applicate.

In topografia vengono utilizzate diverse modalità di posizionamento, che differiscono per precisione e tempi di acquisizione.

Il posizionamento assoluto, eseguito con un singolo ricevitore, consente precisioni dell'ordine del metro, sufficienti per applicazioni generiche ma non per rilievi architettonici di dettaglio.

Al contrario, il posizionamento relativo e differenziale, come nel nostro caso, si basa sul confronto tra un ricevitore fisso, posto in una stazione nota, e uno o più ricevitori mobili: eliminando gli errori comuni (orbitali, atmosferici e strumentali), queste tecniche consentono di raggiungere precisioni centimetrica o sub-centimetrica.

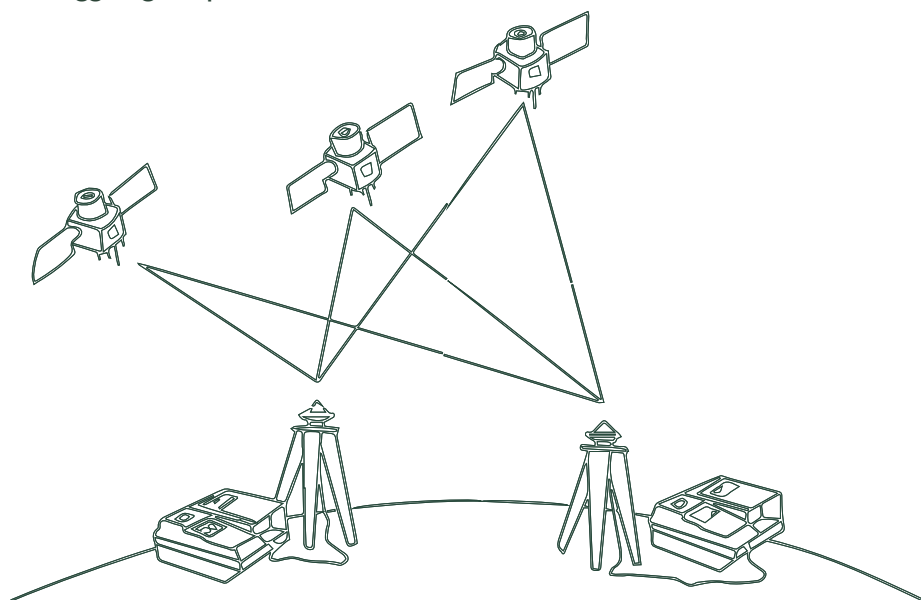


Figura 25: Disegno schematico GNSS (rielaborazione personale)

Accanto alla distinzione tra posizionamento assoluto, relativo e differenziale, è utile descrivere le principali modalità operative con cui vengono acquisite le osservazioni GNSS in ambito topografico. Le tecniche maggiormente impiegate sono il rilievo statico, il rapido statico e il rilievo RTK (Real Time Kinematic), che differiscono per durata dell'osservazione, metodologia di calcolo e livello di accuratezza ottenibile.

Il rilievo statico rappresenta la tecnica più precisa e affidabile. Il ricevitore viene mantenuto fermo sul punto per un intervallo di tempo prolungato, così da acquisire un numero sufficiente di osservazioni di fase della portante. L'elaborazione in post-processing permette di risolvere correttamente le ambiguità e ridurre l'incidenza degli errori

sistematici. Questa modalità è comunemente utilizzata per la realizzazione di reti di inquadramento o per la determinazione di punti fiduciali con precisioni millimetriche o sub-centimetriche.

Il rapido statico (fast-static) si basa sul medesimo principio del rilievo statico, ma con tempi di occupazione molto più brevi, generalmente compresi tra 5 e 15 minuti. L'utilizzo di ricevitori multi-costellazione e multi-frequenza consente una risoluzione più rapida delle ambiguità di fase, garantendo comunque accuratèzze compatibili con la produzione di punti di appoggio e di controllo per rilievi fotogrammetrici o integrazioni multisensore.

La tecnica RTK (Real Time Kinematic) introduce invece la possibilità di ottenere coordinate corrette in tempo reale. Una stazione di riferimento, posta su un punto di coordinate note, trasmette al rover le correzioni differenziali attraverso collegamento radio o rete dati, consentendo il calcolo istantaneo della posizione con precisioni centimetrico-sub-centimetriche. Il rilievo RTK è particolarmente adatto alle operazioni speditive e alla raccolta rapida di punti distribuiti sull'area di studio, risultando uno strumento molto efficace nell'integrazione con altri sistemi di acquisizione 3D, come laser scanning terrestre e fotogrammetria.

L'evoluzione dei ricevitori multi-costellazione, come quelli di ultima generazione, ha ulteriormente migliorato la stabilità della soluzione e la capacità di acquisire punti anche in condizioni ambientali non ottimali.

Questa modalità operativa costituisce il riferimento metodologico adottato nel rilievo condotto sulla Director's House, illustrato nel dettaglio nel capitolo 4.



Figura 26: Emlid REACH RS2
(scheda prodotto Emlid)

3.2.3 Georeferenziazione e Ground Control Points (GCP)

Un aspetto centrale del rilievo topografico, nel quale trovano applicazione i sistemi GNSS, è rappresentato dalla georeferenziazione ovvero dall'operazione che permette di collocare i dati acquisiti all'interno di un sistema di coordinate definito, sia esso globale o locale. Questo passaggio è indispensabile quando si intende integrare più dataset, ad esempio quando si desidera confrontare rilievi eseguiti in tempi diversi per monitorare lo stato di conservazione di un edificio.

La georeferenziazione si basa sull'uso di punti di controllo a terra, noti come Ground Control Points (GCPs). Si tratta di riferimenti fisici collocati in posizioni strategiche dell'area di indagine, le cui coordinate vengono determinate con elevata precisione attraverso ricevitori GNSS o stazioni totali. Una volta rilevati, i GCPs vengono impiegati come ancoraggi spaziali all'interno dei software di elaborazione, consentendo di ridurre deformazioni e di allineare il modello tridimensionale a un sistema di riferimento coerente.

L'accuratezza finale del rilievo dipende in maniera significativa dalla corretta distribuzione e dal numero dei GCPs. Per ottenere buoni risultati, essi devono essere collocati in punti chiaramente riconoscibili nelle immagini o nelle scansioni e distribuiti in maniera omogenea, sia lungo il perimetro dell'area di studio sia al suo interno. Una disposizione squilibrata o insufficiente comporta

errori di scala e distorsioni, compromettendo la qualità metrica dei prodotti derivati.

L'importanza della georeferenziazione risiede anche nella sua capacità di rendere interoperabili i dataset prodotti con strumenti diversi.

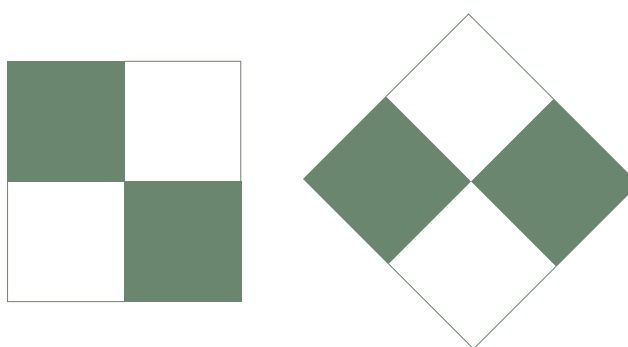


Figura 27: Ground Control Points (rielaborazione personale)

3.2.4 Linee guida ASPRS

Per quest'operazione di rilievo è importante sono state seguite le indicazioni da *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS) Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data* (Ed. 2, 2023), che costituiscono il riferimento internazionale per la raccolta e la validazione di dati geospaziali¹³.

Secondo quanto riportato nell'Addendum II, B.3, i Ground Control Points (GCPs) devono rispettare criteri fondamentali di qualità:

- essere ben definiti (well-defined points), cioè chiaramente identificabili sia sul terreno sia nei dataset elaborati;
- avere una precisione almeno doppia rispetto a quella richiesta per il prodotto geospaziale finale;
- essere distribuiti in maniera omogenea sull'area di studio, evitando concentrazioni o collocazioni in prossimità di discontinuità topografiche;
- essere distinti dai check points, che vengono utilizzati esclusivamente per la validazione dell'accuratezza e non per l'orientamento del modello.

Le linee guida raccomandano inoltre un numero minimo di punti per garantire la robustezza statistica del rilievo e la possibilità di calcolare indicatori di accuratezza (RMSE, deviazione standard, errore medio) secondo criteri scientificamente validati.

Seguire tali procedure permette di rafforzare l'affidabilità del dataset e di garantire che la georeferenziazione finale risponda agli standard di accuratezza richiesti.

3.3 Tecniche LiDAR

Tra le tecniche di rilievo basate sulla misura della distanza, il LiDAR (Light Detection and Ranging) occupa oggi un posto di rilievo per precisione, rapidità e completezza della documentazione. Si tratta di una tecnologia che utilizza un raggio laser per misurare la distanza tra il sensore e l'oggetto colpito, registrando per ogni punto la posizione tridimensionale nello spazio e l'intensità del segnale riflesso. Il risultato dell'acquisizione è una nuvola di punti densa, in grado di descrivere in modo dettagliato geometrie complesse e superfici articolate.

Il principio di funzionamento è relativamente semplice: il sensore emette un impulso laser e misura il tempo che intercorre tra l'emissione e la ricezione del segnale riflesso. Conoscendo la velocità della luce, è possibile calcolare la distanza percorsa e, combinando questo valore con gli angoli di scansione, determinare le coordinate tridimensionali del punto. Ripetendo il processo milioni di volte al secondo, lo strumento genera un modello metrico continuo dell'oggetto o dell'ambiente rilevato.

Il LiDAR può essere installato su piattaforme diverse, a seconda della scala e delle finalità del rilievo. L'ALS (Airborne Laser Scanning) sfrutta sensori montati su aerei, elicotteri o droni, ed è adatto a coprire ampie porzioni di territorio, restituendo modelli digitali del terreno e della superficie con risoluzioni che possono arrivare al dettaglio centimetrico. Il TLS (Terrestrial Laser Scanning), invece, prevede strumenti posizionati a terra, solitamente montati su treppiede, che consentono di acquisire con grande precisione edifici, ambienti interni e manufatti architettonici. Esistono inoltre sistemi di Mobile Mapping, installati su veicoli o supporti portatili, che permettono di eseguire rilievi dinamici lungo percorsi prestabiliti.

L'applicazione del LiDAR nel campo del patrimonio architettonico si è rivelata particolarmente efficace. Grazie alla capacità di acquisire rapidamente milioni di punti, lo strumento consente di documentare edifici complessi, di monitorare deformazioni e di confrontare rilievi eseguiti in tempi diversi.

Oltre alla precisione geometrica, un ulteriore vantaggio del LiDAR è rappresentato

dalla possibilità di registrare più ritorni di uno stesso impulso laser. Ciò significa che un singolo segnale può penetrare parzialmente la vegetazione e restituire sia la quota del suolo sia quella della copertura arborea, rendendo questa tecnologia particolarmente utile anche nelle indagini paesaggistiche e archeologiche.

3.3.1 Laser scanner terrestri (TLS)

Il Terrestrial Laser Scanning (TLS) rappresenta oggi una delle soluzioni più diffuse per il rilievo tridimensionale in ambito architettonico e archeologico. Si tratta di strumenti posizionati su treppiede, in grado di acquisire milioni di punti in pochi minuti e di restituire una documentazione metrica estremamente precisa delle superfici rilevate. L'affidabilità del TLS risiede nella capacità di misurare distanze e angoli con continuità, generando nuvole di punti dense e omogenee che descrivono in modo esaustivo l'oggetto.

Esistono diverse tipologie di laser scanner terrestri, che si distinguono in base al principio di misurazione della distanza. Una prima categoria è quella degli scanner a triangolazione. In questo caso il sensore proietta un raggio laser sull'oggetto, generando un punto luminoso che viene ripreso da una fotocamera o da un sensore ottico posto lateralmente. Conoscendo la distanza tra trasmettitore e ricevitore e misurando l'angolo di riflessione,



Figura 28: TLS Leica (fonte: Leica)

è possibile determinare per via geometrica la posizione del punto nello spazio. Questa tecnologia garantisce un'elevata precisione, con errori dell'ordine del millimetro, ma è limitata a brevi distanze e trova quindi applicazione soprattutto nella scansione di piccoli manufatti o di elementi architettonici di dettaglio.

Un secondo gruppo è quello degli scanner TOF (Time of Flight). In questo caso lo strumento calcola la distanza misurando il tempo che intercorre tra l'emissione di un

impulso laser e la ricezione del segnale riflesso. Grazie a questa tecnica, è possibile coprire distanze molto maggiori, anche centinaia di metri, rendendo questo tipo di scanner adatto alla documentazione di edifici di grandi dimensioni o di aree urbane. La precisione, leggermente inferiore rispetto alla triangolazione, si mantiene comunque nell'ordine di pochi millimetri.

Infine, vi sono gli scanner a differenza di fase. In questo caso, il laser emette un fascio continuo con andamento sinusoidale e frequenza nota; la distanza viene calcolata misurando lo sfasamento tra l'onda emessa e quella riflessa. Questa tecnica consente una rapidità di acquisizione molto elevata, con milioni di punti registrati al secondo, ma risulta meno efficace sulle lunghe distanze rispetto al tempo di volo.

Indipendentemente dal principio utilizzato, i laser scanner terrestri permettono di acquisire nuvole di punti che descrivono in maniera continua la superficie di un oggetto, senza la necessità di selezionare preventivamente i punti da misurare, come avviene con la stazione totale. Questa caratteristica li rende particolarmente adatti alla documentazione del patrimonio architettonico, dove la complessità delle geometrie e la presenza di decorazioni richiedono un livello di dettaglio che solo le tecnologie range-based possono garantire.

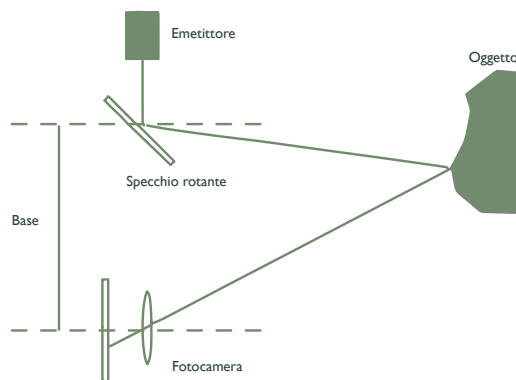


Figura 29: scanner a triangolazione(rielaborazione personale)



Figura 30: scanner distanziometrici - TOF (rielaborazione personale)

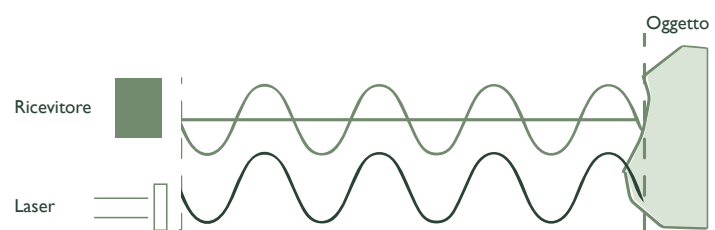


Figura 31: scanner a differenza di fase (rielaborazione personale)

3.4 Sistemi di Mobile Mapping e algoritmi

Negli ultimi anni, accanto alle tecniche più consolidate come la fotogrammetria e il laser scanning terrestre, si sono diffuse soluzioni di rilievo mobile, note con il termine Mobile Mapping Systems (MMS). Questi sistemi sono pensati per acquisire dati tridimensionali in movimento, montando i sensori su supporti portatili, veicoli terrestri o droni, così da documentare rapidamente grandi ambienti senza la necessità di posizionare lo strumento in stazioni fisse.

La logica che guida i sistemi di mobile mapping si basa sulla capacità di combinare sensori diversi: laser scanner, fotocamere digitali, ricevitori GNSS e unità inerziali (IMU). L'integrazione di queste tecnologie consente di registrare simultaneamente dati geometrici e informazioni di posizione e orientamento, costruendo modelli tridimensionali che si aggiornano in tempo reale durante lo spostamento dell'operatore o del veicolo.

Un ruolo centrale in questo contesto è svolto dagli algoritmi SLAM (Simultaneous Localization and Mapping). Nati originariamente in ambito robotico, questi algoritmi risolvono il duplice problema di localizzare il sensore in un ambiente sconosciuto e, allo stesso tempo, di costruirne la mappa tridimensionale. Il principio si basa sull'individuazione di punti caratteristici, o landmarks, che vengono riconosciuti e ri-osservati durante il movimento. Confrontando continuamente le nuove osservazioni con quelle precedenti, l'algoritmo riduce l'incertezza della traiettoria e migliora la coerenza della mappa.

Questa capacità di auto-localizzazione senza l'ausilio del GPS rende i sistemi SLAM particolarmente utili in ambienti chiusi o in contesti complessi, come interni architettonici, gallerie o aree sotterranee, dove le tecniche di posizionamento satellitare non sono disponibili o risultano poco affidabili. Nel rilievo architettonico, i dispositivi portatili basati su SLAM – spesso in forma di zaini o sensori palmari – permettono di muoversi all'interno degli edifici acquisendo rapidamente una nuvola di punti continua.

I vantaggi di questa tecnologia sono evidenti: rapidità di acquisizione, flessibilità di movimento, riduzione del tempo di lavoro sul campo. Tuttavia, le nuvole generate da sistemi

SLAM possono risultare più rumorose rispetto a quelle ottenute con laser scanner statici, ed è spesso necessario applicare procedure di filtraggio e allineamento per migliorarne la qualità. La precisione finale dipende in gran parte dalla complessità dell'ambiente: spazi ricchi di geometrie e dettagli facilitano il riconoscimento dei punti di riferimento, mentre superfici lisce o ambienti affollati possono introdurre errori.

Nonostante questi limiti, i sistemi di mobile mapping rappresentano oggi una risorsa importante per la documentazione del patrimonio culturale. La loro capacità di acquisire dati in maniera veloce e non invasiva li rende ideali per rilievi preliminari, per campagne di monitoraggio ripetute e per l'integrazione con altre tecniche di acquisizione. In un'ottica di workflow integrato, gli MMS basati su SLAM si affiancano dunque a fotogrammetria e LiDAR statico, contribuendo a costruire modelli tridimensionali completi e coerenti, in grado di rispondere alle esigenze della ricerca, della conservazione e della valorizzazione del patrimonio architettonico.



31



32

Figura 32, 33: Slam Hovermap Emesent (fonte: Emesent Hovermap)

3.5 Looq AI

Negli ultimi anni i sistemi di mobile mapping hanno assunto un ruolo sempre più rilevante nel campo della geomatica e della documentazione tridimensionale, grazie alla loro



Figura 34, 35: Looq AI (fonte: Looq AI)

capacità di unire l'efficienza della mappatura in movimento con la precisione delle tecniche image-based.

In questo contesto si colloca il Looq AI, una piattaforma innovativa di rilievo fotogrammetrico terrestre mobile che coniuga l'acquisizione automatizzata di immagini panoramiche con algoritmi di ricostruzione tridimensionale basati su intelligenza artificiale.

È stato sviluppato dalla startup Looq AI, fondata nel 2021 a San Diego (California) da Dominique Meyer e Shreyas Niradi, con l'obiettivo di creare una tecnologia basata su fotogrammetria computazionale e intelligenza artificiale capace di digitalizzare l'ambiente costruito, rendendo disponibili dati spaziali accurati, operativi e fruibili in tempo reale.

3.5.1 Principio di funzionamento

Il sistema adotta un approccio fotogrammetrico multi-camera: un insieme di camere digitali grandangolari acquisisce in modo sincronizzato sequenze d'immagini da più punti di vista, mentre un ricevitore GNSS e sensori inerziali (IMU) integrati tracciano la traiettoria dello strumento nello spazio.

Le IMU (Inertial Measurement Unit) costituiscono una componente fondamentale nei sistemi di rilievo mobile: si tratta di sensori che registrano in tempo reale accelerazioni lineari e rotazioni angolari del dispositivo lungo i tre assi spaziali (X,Y,Z). In combinazio-

ne con il GNSS, i dati IMU permettono di ricostruire la traiettoria e l'orientamento del sistema in ogni istante, garantendo la continuità del rilievo anche in condizioni di segnale satellitare debole o assente. L'integrazione tra le due fonti di dati, posizione assoluta e movimento relativo, migliora la stabilità e la precisione metrica del modello tridimensionale.

Le immagini acquisite, combinate con i dati di posizione, vengono elaborate mediante una pipeline fotogrammetrica automatizzata supportata da modelli di apprendimento automatico per la selezione dei tie points e per la stima robusta dell'orientamento esterno.

Il risultato finale è una nuvola di punti densa e georiferita, in grado di rappresentare in modo realistico la geometria e la cromia delle superfici.



Figura 36 Looq AI (fonte: Looq AI)

3.5.2 Perché “AI”: il ruolo dell’intelligenza artificiale

Il termine “AI” nel nome Looq AI riflette l'utilizzo di algoritmi di Intelligenza Artificiale all'interno del processo di elaborazione fotogrammetrica. L'AI non sostituisce la logica geometrica della fotogrammetria, ma ne potenzia le fasi più complesse, migliorandone efficienza e stabilità.

In particolare:

- l'AI riconosce automaticamente i punti omologhi tra immagini consecutive, filtrando quelli errati o ridondanti;
- ottimizza i parametri interni ed esterni delle camere durante il bundle adjustment, correggendo distorsioni o disallineamenti;
- classifica e pulisce la nuvola di punti, individuando superfici e oggetti ripetitivi o rumorosi.

Questa automazione riduce sensibilmente i tempi di elaborazione e gli errori umani, consentendo la generazione di modelli 3D accurati in tempi estremamente brevi. L'intelligenza artificiale è dunque parte integrante della pipeline di Looq AI, che può essere definita un sistema di "AI-assisted photogrammetry".

3.5.3 Differenze rispetto ai sistemi SLAM

Il Looq AI rientra nella categoria dei Mobile Mapping Systems (MMS), ma si distingue dai sistemi tradizionali basati su tecnologia LiDAR e algoritmi SLAM (Simultaneous Localization and Mapping).

Nei sistemi SLAM, la ricostruzione tridimensionale avviene attraverso misure dirette di distanza laser: il sensore rileva in tempo reale la propria posizione calcolando le variazioni della scena e costruendo la mappa tridimensionale mentre si muove. Questa metodologia è particolarmente efficace in ambienti chiusi, ma può produrre nuvole di punti meno cromaticamente dettagliate e più rumorose.

Il Looq AI, al contrario, adotta un approccio fotogrammetrico: utilizza immagini RGB ad alta risoluzione combinate con dati GNSS e IMU, generando la geometria attraverso processi di correlazione ottica e triangolazione. Non si basa dunque su algoritmi SLAM, ma su una ricostruzione fotogrammetrica assistita da AI, che offre una resa visiva superiore e una maggiore densità di punti.

Il Looq AI appartiene alla categoria dei sistemi reality-based di nuova generazione, collocandosi a metà tra i rilievi laser scanner (TLS) e quelli fotogrammetrici convenzionali.

Rispetto ai primi, si distingue per la leggerezza, la velocità e la semplicità d'impiego; rispetto ai secondi, per la maggiore automazione del processo di acquisizione e allineamento.

Questa tipologia di strumentazione nasce dall'esigenza di ridurre i tempi di rilievo e di fornire un flusso di lavoro continuo, senza la necessità di stazioni statiche o target di appoggio. I dati vengono raccolti lungo un percorso prestabilito — generalmente un tracciato serpentinato o a griglia — che garantisce la copertura uniforme dell'area di interesse e la sovrapposizione necessaria per la ricostruzione stereoscopica.

3.5.4 Accuratezza e prestazioni

Dal punto di vista metrico, la precisione ottenibile con sistemi di questo tipo varia in funzione della qualità del segnale GNSS e della calibrazione delle camere. Come sottolineato da Furby, B. e Akhavian, R. in *A Comprehensive Comparison of Photogrammetric and RTK-GPS Methods for General Order Land Surveying* si evidenziano errori medi dell'ordine di 2–3 cm in planimetria e 3–5 cm in altimetria, con una densità di punti che può superare diversi milioni al minuto. Il modello 3D generato presenta una notevole ricchezza cromatica, derivata direttamente dalle immagini RGB, ma può evidenziare una distribuzione puntuale meno omogenea rispetto alle nuvole di punti acquisite tramite sensori LiDAR.

Il Looq AI si distingue inoltre per l'integrazione di un sistema di elaborazione cloud automatizzato, che consente la generazione del modello tridimensionale senza la necessità di interventi manuali.

Le immagini vengono caricate su una piattaforma online proprietaria (Looq Platform), che esegue automaticamente la triangolazione, la ricostruzione della nuvola di punti e la restituzione del modello georiferito nel sistema di coordinate globale.

Il workflow proposto riduce drasticamente le tempistiche di elaborazione e consente un accesso distribuito ai dati, favorendo la condivisione tra gruppi di ricerca e operatori sul campo.



Figura 37, 38: immagini esterne ottenute tramite Looq AI (fonte: Looq Platform)



Figura 39, 40: immagini interne a piano terra - sx - e piano primo - dx - ottenute tramite Looq AI (fonte: Looq Platform)

3.6 Fotogrammetria

La fotogrammetria è una tecnica che ha origine nel XIX secolo e che si lega fortemente alla nascita della fotografia di metà Ottocento, è definita come “la scienza che consente di estrarre informazioni da immagini e di presentarle all’utente in maniera efficace”¹⁴.



Figura 41: proiezione centrale (fonte: rielaborazione personale)

È la disciplina che consente, attraverso l’acquisizione e l’elaborazione di immagini fotografiche di ottenere informazioni metriche e geometriche su oggetti fisici e ambienti circostanti. Essa si fonda sul principio della proiezione centrale,

nella quale i raggi visivi provenienti da un oggetto convergono nel centro ottico della camera e vengono proiettati sul piano dell’immagine, generando così una corrispondenza diretta tra spazio reale e rappresentazione fotografica.

Le prime applicazioni, limitate dalle distorsioni ottiche degli obiettivi e dalla difficoltà di calcolare correttamente le relazioni geometriche tra le immagini, hanno poi visto nel corso del tempo una grande evoluzione. Con il passare del tempo e delle generazioni si sono integrate innovazioni ottiche, meccaniche e fino ad arrivare a oggi ormai fortemente digitale.

Successivamente al dagherrotipo, uno dei primi processi fotografici commercializzati, si è passati alle tre fasi note come fotogrammetria analogica, analitica e digitale.

La prima, quella analogica, prende avvio all’inizio del Novecento, con l’invenzione della stereofotogrammetria e consentiva di ricostruire in tre dimensioni una scena osservando in visione stereoscopica una coppia di fotogrammi. Da qui si svilupparono le prime cartografie aeree con l’arrivo della conseguente Prima Guerra Mondiale.

Negli anni a seguire, con l’avvento dell’informatica, si impose la fotogrammetria analitica. La ricostruzione tridimensionale veniva affidata esclusivamente a calcoli matematici basati sulle equazioni di geometria proiettiva. Questa fase segnò il passaggio dalla restituzione manuale alla modellazione numerica e permise di trasformare le coordinate dei

punti di una fotografia in coordinate geografiche.

Infine, si è arrivati alla fotogrammetria digitale, che a partire dagli anni '90, avvalendosi dell'incremento delle prestazioni informatiche, ha consentito di rendere l'intero sistema più veloce ed efficiente.

Al giorno d'oggi la fotogrammetria ricopre un ruolo centrale nella conservazione dei beni architettonici del patrimonio culturale. Servendosi di questi strumenti, si riesce a fornire una documentazione accurata sullo stato di conservazione e manutenzione di edifici di interesse locale, nazionale o internazionale.

Si distingue dalle altre tecniche citate in precedenza, per il fatto di essere un sistema che segue il metodo image-based. Bisogna precisare che si possono utilizzare camere di diversa natura, dai sensori professionali alle fotocamere digitali di uso comune. Grazie alla possibilità di utilizzare dispositivi a basso costo, ma in grado comunque di fornire ottimi livelli di accuratezza, ha avuto ampia diffusione.

Parte fondamentale è quindi l'acquisizione di immagini fotografiche da cui ricavare informazioni metriche e geometriche dell'oggetto studiato (coordinate x, y, z) attraverso l'impiego della fotocamera.

Quando un'immagine fotografica viene impiegata per scopi di misura, essa assume il valore di fotogramma, ossia di rappresentazione in cui le proporzioni tra oggetto e immagine sono determinate da precise relazioni geometriche.

Il fotogramma può essere inteso come una proiezione del mondo reale sul piano dell'immagine, in cui la scala è definita a partire dai parametri interni della camera e dalla distanza tra sensore e soggetto ripreso.

3.6.1 I principi della fotogrammetria

Il principio alla base della fotogrammetria è strettamente connesso al fenomeno della stereoscopia, ovvero la capacità di percepire la profondità grazie alla visione simultanea di due immagini acquisite da posizioni leggermente diverse. Si tratta di un processo che riproduce un meccanismo naturale della percezione umana: i nostri occhi osservano lo stesso oggetto da punti di vista distinti, generando immagini differenti che il cervello integra in una rappresentazione tridimensionale.

In ambito fotogrammetrico, questo meccanismo viene replicato attraverso la presa di coppie di fotogrammi con un adeguato grado di sovrapposizione. Quando le condizioni di ripresa – assi ottici paralleli, quota di presa uniforme e distanza proporzionata tra camere e oggetto – sono rispettate, diventa possibile individuare punti omologhi nelle immagini e ricostruirne la posizione nello spazio. In questo modo, un'informazione bidimensionale si trasforma in dato metrico, aprendo la strada alla restituzione cartografica e architettonica.

Il principio stereoscopico trova formalizzazione nelle equazioni di collinearità, che descrivono matematicamente la proiezione centrale: ogni punto reale, il centro di presa della camera e il corrispondente punto sul fotogramma giacciono su una stessa retta.

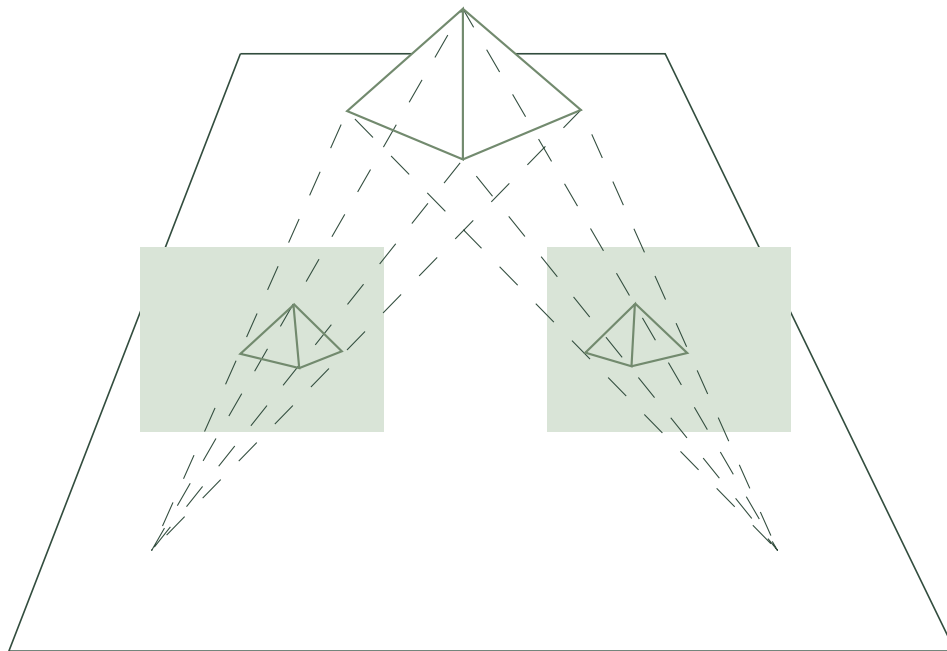


Figura 42: stereoscopia (fonte: rielaborazione personale)

Questa relazione stabilisce il legame tra coordinate tridimensionali di un punto e le sue coordinate bidimensionali sull'immagine, tenendo conto di due insiemi di parametri:

- interni, legati alle caratteristiche dell'obiettivo e alla distanza focale;
- esterni, che definiscono posizione e orientamento della camera al momento dello scatto.

A livello matematico tale relazione è espressa dalle equazioni di collinearità, nella loro forma canonica:

$$x - x_0 = -c \frac{r_{11}(X - X_S) + r_{12}(Y - Y_S) + r_{13}(Z - Z_S)}{r_{31}(X - X_S) + r_{32}(Y - Y_S) + r_{33}(Z - Z_S)}$$

$$y - y_0 = -c \frac{r_{21}(X - X_S) + r_{22}(Y - Y_S) + r_{23}(Z - Z_S)}{r_{31}(X - X_S) + r_{32}(Y - Y_S) + r_{33}(Z - Z_S)}$$

Dove (X, Y, Z) sono le coordinate del punto oggetto, (X_S, Y_S, Z_S) quelle del centro di presa, (x, y) le coordinate immagine, mentre r_{ij} rappresentano gli elementi della matrice di rotazione che descrive l'orientamento della camera nello spazio.

Nella pratica operativa, l'individuazione dello stesso punto in almeno due fotogrammi consente di risolvere il sistema delle equazioni e di determinarne la posizione spaziale. La ridondanza delle osservazioni, cioè la presenza dello stesso punto in più immagini, accresce la precisione e permette di compensare gli errori tramite metodi statistici, come l'aggiustamento ai minimi quadrati. Le equazioni di collinearità costituiscono dunque il nucleo matematico della fotogrammetria e rappresentano la base dei software di elaborazione, che automatizzano il calcolo e permettono il passaggio dai fotogrammi bidimensionali a modelli tridimensionali metricamente accurati.

3.6.2 Calibrazione delle camere e orientamento delle immagini

Per garantire l'affidabilità metrica del modello ricostruito, è necessario tener conto delle inevitabili imperfezioni introdotte dai sistemi ottici reali. Il modello teorico della proiezione centrale, basato sul principio della collinearità, presuppone che i raggi luminosi convergano senza deviazioni verso il centro di presa. Tuttavia, nella pratica, il comportamento dell'obiettivo si discosta da questo schema ideale: la presenza di lenti multiple, la loro geometria e il loro allineamento determinano piccole deviazioni che generano spostamenti misurabili sul piano immagine.

In un obiettivo reale, infatti, il raggio luminoso attraversa il primo punto nodale e viene rifratto uscendo dal secondo, definendo così la posizione finale del punto fotografato. L'angolo formato dal raggio rifratto rispetto all'asse ottico differisce leggermente da quello del raggio incidente, e questo scarto si traduce in una distorsione: ossia nella differenza tra la posizione ideale del punto e quella effettivamente registrata sul sensore.

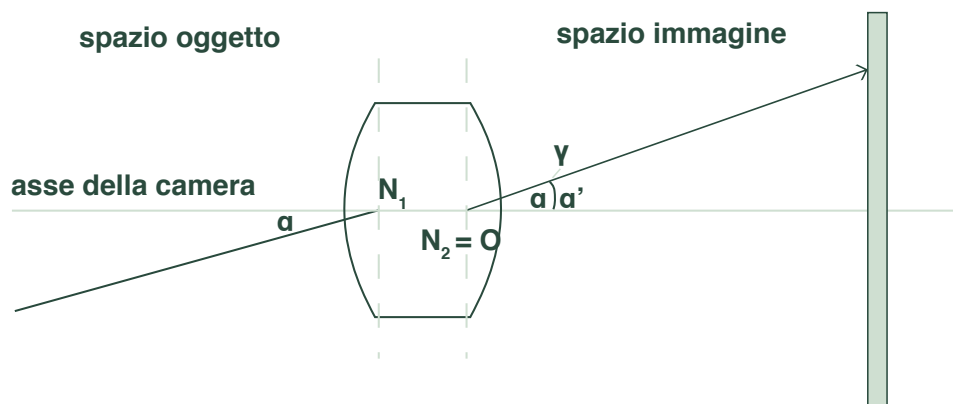


Figura 43: Rappresentazione della distorsione (fonte: rielaborazione personale)

Per quantificare e correggere tali deviazioni si procede alla calibrazione della camera, un passaggio fondamentale per ottenere informazioni tridimensionali coerenti a partire da immagini bidimensionali. La calibrazione consente di stimare i parametri che descrivono la geometria interna della camera (orientamento interno), l'assetto e la posizione al momento dello scatto (orientamento esterno) e i coefficienti che modellano le distorsioni dell'obiettivo. Nei modelli più completi si tiene conto anche di eventuali differenze di scala legate a pixel non perfettamente quadrati.

Tra le anomalie più frequenti si distinguono:

- distorsione radiale, che produce deformazioni riconoscibili come effetto “a bariotto” o “a cuscinetto”, più marcate all’aumentare della distanza dal punto principale;
- distorsione tangenziale, dovuta a minimi disallineamenti tra gli elementi ottici che causano uno spostamento laterale dei punti ai margini dell’immagine.

I parametri necessari alla calibrazione possono essere forniti dal produttore nel caso delle camere metriche oppure stimati tramite autocalibrazione nei software fotogrammetrici, una procedura indispensabile soprattutto quando si utilizzano camere amatoriali o semimetriche. La correzione di tali distorsioni permette di riportare la camera a un comportamento ottico quanto più possibile vicino al modello teorico.

Il processo fotogrammetrico: orientamento interno, relativo e assoluto

La calibrazione rappresenta solo il primo passaggio dell’elaborazione fotogrammetrica. A essa si affianca la sequenza di operazioni di orientamento, necessarie per ricostruire un modello tridimensionale consistente e geograficamente corretto. Il workflow classico si articola in tre fasi principali.

1. Orientamento interno

In questa fase vengono definiti e fissati i parametri che descrivono la geometria interna della camera, tra cui:

- lunghezza focale effettiva,
- posizione del punto principale,
- eventuale skew del sensore,
- parametri di distorsione residua.

L’orientamento interno consente di trasporre la camera reale nel modello matematico, assicurando che la generazione dei raggi proiettivi sia coerente con il comportamento dell’obiettivo.

2. Orientamento relativo

L’orientamento relativo stabilisce le relazioni geometriche tra le immagini che compongono il blocco fotogrammetrico. In questa fase vengono stimati:

- il reciproco posizionamento delle camere,

- l'assetto di ciascuna al momento dello scatto,
- la baseline stereo da cui dipende la percezione della profondità.

Il modello ottenuto è correttamente strutturato ma non ancora inserito in una scala reale o in un riferimento geografico: si tratta di un modello “libero”, definito solo dalle relazioni geometriche interne al blocco.

3. Orientamento assoluto

L'orientamento assoluto ha l'obiettivo di collocare il modello ricostruito in un sistema di riferimento reale. Ciò avviene utilizzando:

- punti di controllo a terra (GCPs),
- coordinate note rilevate con GNSS o stazione totale,
- marker o target riconoscibili in più immagini.

Questa fase consente di attribuire al modello una scala reale, un corretto orientamento nello spazio e la piena georeferenziazione nel sistema di coordinate scelto. Senza l'orientamento assoluto il modello risulterebbe coerente nelle sue proporzioni interne, ma rimarrebbe privo di qualsiasi riferimento metrico o geografico effettivo.

Triangolazione aerea e aggiustamento

Una volta definiti i parametri interni e inseriti i punti di controllo, l'intero blocco fotogrammetrico viene perfezionato tramite la triangolazione aerea, o bundle block adjustment. Tale procedura realizza una compensazione simultanea dei parametri interni ed esterni delle camere, delle coordinate tridimensionali dei punti omologhi e dei residui di distorsione, riducendo al minimo gli errori osservativi secondo un modello statistico di tipo Gauss–Markov.

Il risultato è un blocco completamente orientato, calibrato e metricamente affidabile, pronto per la derivazione dei principali elaborati fotogrammetrici. La fase di calibrazione, integrata con le tre operazioni di orientamento delle immagini, costituisce dunque il fulcro dell'intero processo fotogrammetrico. Grazie a questo insieme di procedure è possibile correggere le imperfezioni ottiche, garantire la coerenza geometrica tra le immagini e collocare il modello tridimensionale in un sistema metrico e georeferenziato.

3.6.3 Acquisizione dei dati fotogrammetrici

La fotogrammetria, a seconda delle modalità di acquisizione si può classificare in

- **Satellitare:** per immagini ad alta quota destinate alla produzione di cartografie tematiche, modelli digitali del terreno. Questa tecnica viene utilizzata per analisi territoriali ed ambientali.

- **Aerea,** con fotocamere installate su aeroplani e elicotteri. Si possono distinguere due tipologie di riprese, a seconda dell'inclinazione dell'asse ottico: nadirali (quando la camera è orientata verticalmente verso il terreno) e oblique, (quando l'asse è inclinato).

- **UAV** (unmanned aerial vehicles), con camere installate su droni che volano a bassa quota. È un'evoluzione della pratica precedente. I droni permettono di acquisire immagini ad alta risoluzione a quote inferiori ai trecento metri, garantendo un livello di dettaglio elevato. Le missioni di volo possono essere pianificate in modo automatizzato, assicurando sovrapposizioni regolari tra le immagini e la copertura completa dell'oggetto pianificando il volo seguendo sempre direzioni parallele. È una tecnica molto utilizzata nella documentazione del patrimonio storico, a maggior ragione nei contesti urbani degradati e difficilmente accessibili.

- **Terrestre,** nel caso di riprese ravvicinate al suolo, con il posizionamento di camere direttamente sul terreno. Si acquisiscono immagini dettagliate di facciate, interni, elementi decorativi. Tecnica ideale per una documentazione architettonica più completa. I risultati dipendono dalla corretta pianificazione delle riprese, che deve garantire una sufficiente sovrapposizione tra i fotogrammi e una distribuzione omogenea dei punti di vista.

In tutte e quattro queste modalità, la qualità e l'accuratezza dei risultati dipendono in gran parte dalla fase preliminare: la scelta della posizione della camera, l'illuminazione, la distanza

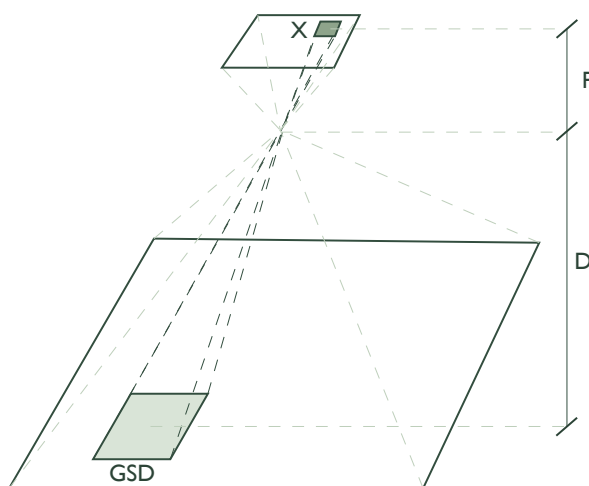


Figura 44: Ground Sample Distance, disegno esemplificativo
(fonte: rielaborazione personale)

dall'oggetto e il grado di sovrapposizione tra le fotografie sono elementi che incidono direttamente sulla possibilità di ricostruire la scena tridimensionale.

Il parametro che però sintetizza più di ogni altro la qualità geometrica di un'immagine fotogrammetrica da rispettare è il Ground Sampling Distance (GSD). Questo valore indica la dimensione reale, a terra, che corrisponde a un singolo pixel dell'immagine. In altre parole, il GSD stabilisce il livello di dettaglio del modello: più piccolo è il valore, maggiore sarà la capacità di descrivere con precisione le caratteristiche dell'oggetto rilevato.

Una volta definito, si potranno precisare l'altezza di volo o la distanza di presa.

$$GSD = (D * X) / P$$

Dove:

- » **D** = distanza di presa (Shooting Distance)
- » **X** = dimensione del pixel sul sensore (Pixel Size)
- » **P** = lunghezza focale (proprietà dell'obiettivo)

Il GSD è influenzato principalmente da tre fattori: la distanza tra la camera e l'oggetto, la lunghezza focale dell'obiettivo e le dimensioni del sensore fotografico. Ad esempio, aumentando l'altezza di volo del drone il valore del GSD cresce, e di conseguenza la risoluzione spaziale diminuisce; viceversa, abbassando la quota di ripresa o utilizzando obiettivi con maggiore lunghezza focale, si ottengono immagini più dettagliate.

Un corretto dimensionamento del GSD va stabilito già in fase di pianificazione del rilievo, sulla base della scala di restituzione desiderata e degli obiettivi. Per la documentazione di edifici storici o elementi architettonici complessi, è generalmente richiesto un GSD di pochi millimetri per poter cogliere anche le minime variazioni geometriche e materiche. Nei rilievi territoriali o urbani di più ampia scala, invece, possono essere accettati valori maggiori, che permettono di coprire superfici più estese riducendo il numero di immagini necessarie.

Oltre al GSD, un'altra caratteristica fondamentale delle immagini riguarda la loro sovrapposizione. Una corretta pianificazione deve garantire che ogni punto dell'oggetto sia visibile in almeno due o tre fotogrammi consecutivi. Ciò consente agli algoritmi di riconoscere punti omologhi e di ricostruirne la posizione tridimensionale con maggiore

stabilità.

Le immagini, una volta acquisite vengono sottoposte ad un processo di orientamento che trasformerà le immagini in dati 3D. Questo processo è diviso su due livelli: interno, riguarda la definizione dei parametri ottici della camera e la correzione delle distorsioni introdotte dall'obiettivo e quello esterno, che descrive la posizione e l'assetto della camera al momento dello scatto.

Tutti questi parametri non fanno altro che ricondurre ogni fotografia ad un modello di proiezione centrale teorico e di collocarla in modo coerente rispetto allo spazio oggetto.

Passata questa fase, il passo successivo è l'individuazione dei punti omologhi attraverso l'orientamento relativo, cioè dei punti che corrispondono alla stessa porzione di oggetto visibile in due o più fotogrammi. Questo riconoscimento avviene grazie all'uso di sofisticati algoritmi di correlazione che confrontano caratteristiche geometriche (FBM: Feature Based Matching), radiometriche e spaziali (RM: Relation Matching), livelli di grigio in piccole aree tra coppie di immagini (Area Based Matching). Tramite questi vengono stabiliti elevati gradi di affidabilità.

Dalla relazione tra i raggi proiettivi che connettono i centri di presa con i punti omologhi si ricava la posizione spaziale dei punti stessi, generando così il modello tridimensionale. In questa fase, detta di triangolazione fotogrammetrica, il sistema risolve un complesso insieme di equazioni che traducono i dati bidimensionali in coordinate cartesiane. L'accuratezza del modello dipende non solo dalla precisione dei calcoli, ma anche dalla distribuzione spaziale delle prese fotografiche e dall'eventuale presenza di Ground Control Points (GCPs), punti di controllo a terra utilizzati come riferimento.

Le tecniche si sono evolute profondamente: dalla fotogrammetria analogica, basata su procedimenti manuali, si è arrivati ai nostri moderni metodi digitali. Questi ultimi, grazie all'utilizzo di algoritmi avanzati come lo Structure from Motion (SfM) consentono l'elaborazione e l'analisi automatizzata delle immagini, producendo modelli 3D ad alta risoluzione.

3.7 Structure from Motion (SfM)

All'interno della fotogrammetria digitale, la Structure from Motion (SfM) combina i principi della geometria proiettiva con algoritmi avanzati, consentendo di ricostruire in modo automatico la geometria tridimensionale di un edificio o di un ambiente a partire da una serie di immagini digitali, senza che sia necessario conoscere preventivamente la posizione delle camere o i parametri interni degli obiettivi.

La prima fase del processo è l'acquisizione fotografica. È fondamentale garantire una copertura adeguata dell'oggetto o dello spazio da documentare, realizzando un numero elevato di immagini da prospettive differenti e con sufficiente sovrapposizione.

Segue la fase di estrazione e riconoscimento delle caratteristiche. Gli algoritmi analizzano le fotografie per individuare punti di interesse (features) legati a contrasti, spigoli o pattern. Tali punti vengono descritti e confrontati tra le immagini attraverso procedure di matching, che permettono di riconoscere le corrispondenze e di costruire una rete di legami che connette le fotografie tra loro.

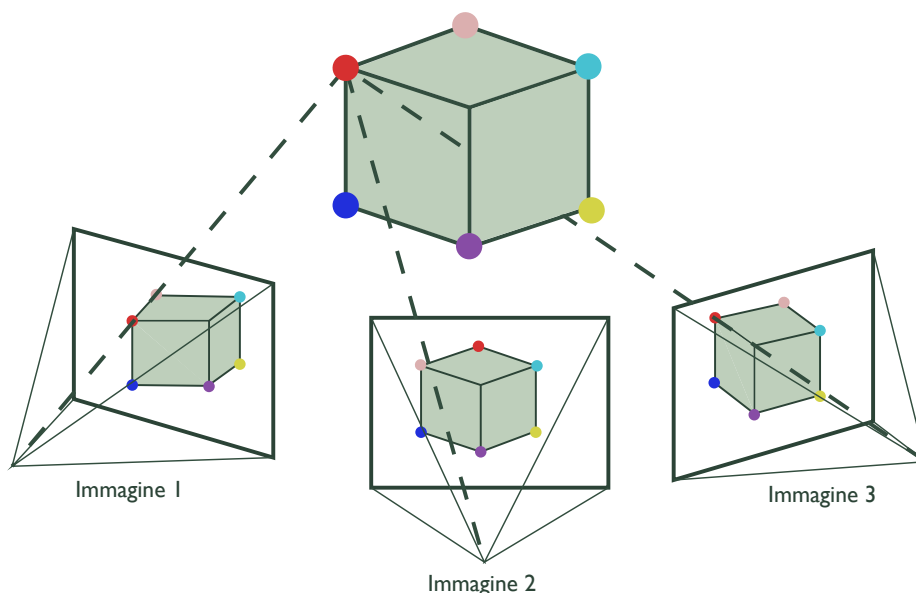


Figura 45: schema Structure from Motion (fonte: rielaborazione personale)

Sulla base di queste corrispondenze, il software procede all'orientamento delle immagini, stimando contemporaneamente la posizione e l'assetto delle camere e la disposi-

zione spaziale dei punti omologhi. Questa fase, nota come bundle adjustment, consiste in un processo iterativo che minimizza gli errori globali e restituisce una configurazione coerente e metricamente affidabile. In questo modo viene generata una prima nuvola di punti sparsa, che descrive in maniera approssimativa la geometria complessiva.

A partire da questa, si applicano algoritmi di dense matching, capaci di estrarre corrispondenze aggiuntive e aumentare notevolmente il numero di punti rilevati. Il risultato è una nuvola di punti densa, in grado di rappresentare con elevato dettaglio la geometria superficiale dell'oggetto. Dalla nuvola di punti densa è poi possibile derivare prodotti più avanzati.

Uno dei risultati più diffusi è l'ortofoto, cioè un'immagine raster corretta geometricamente che mantiene la qualità fotografica ma assume valore metrico. Essa viene prodotta proiettando i pixel delle fotografie sul modello tridimensionale, in modo da eliminare deformazioni prospettiche e distorsioni ottiche. L'ortofoto è particolarmente utile per la documentazione delle superfici architettoniche, perché permette di leggere in scala dettagli costruttivi, tracce di degrado o elementi decorativi.

Dalla nuvola di punti è inoltre possibile estrarre modelli digitali di superficie (DSM) e modelli digitali del terreno (DTM). I primi descrivono la morfologia complessiva dell'area rilevata, includendo edifici, vegetazione e manufatti; i secondi, invece, rappresentano esclusivamente l'andamento del suolo, depurato dagli elementi emergenti. Questi modelli sono fondamentali sia per analisi di tipo territoriale sia per applicazioni architettoniche, ad esempio nella progettazione di interventi di restauro che coinvolgono la relazione tra edificio e contesto.

Un ulteriore prodotto è costituito dalle mesh tridimensionali, che trasformano la nuvola di punti in una superficie continua composta da poligoni. A questa superficie può essere applicata la texture ricavata dalle immagini originali, ottenendo modelli 3D fotorealistici che uniscono accuratezza geometrica e qualità visiva.

Infine, dai dati SfM si possono ricavare sezioni, piante e prospetti generati direttamente dal modello tridimensionale. Questa possibilità consente di produrre elaborati tecnici aggiornabili e coerenti con la realtà rilevata, superando i limiti delle rappresentazioni

tradizionali e aprendo la strada a workflow integrati con piattaforme BIM e sistemi informativi.

L'ampiezza dei prodotti ottenibili rende la Structure from Motion una metodologia estremamente flessibile e divenuta una delle tecniche più adottate nella documentazione e nello studio del patrimonio architettonico.

3.7.1 Vantaggi SfM

Rispetto alla fotogrammetria tradizionale presenta due vantaggi sostanziali.

- Riduzione di operazioni preliminari complesse, poiché non richiede strumenti metrici calibrati, ma può essere eseguita anche con fotocamere commerciali o sensori montati su droni e smartphone.
- Il processo è più accessibile grazie all'automatizzazione del software che gestisce gran parte delle operazioni.

La qualità del risultato rimane comunque strettamente legata al numero e alla distribuzione delle immagini acquisite. L'assenza di informazioni metriche a priori rende indispensabile l'uso di punti di controllo a terra per garantire la scala e l'allineamento al sistema di riferimento desiderato.

La SfM si è affermata come una delle tecniche più diffuse per il rilievo del patrimonio culturale, perché coniuga rapidità di acquisizione a un livello di dettaglio sufficiente a documentare in modo rigoroso manufatti architettonici complessi. In molti casi, essa viene integrata con altre tecniche di rilievo, come il laser scanning, in un approccio che sfrutta i punti di forza di ciascun metodo per ottenere modelli completi, georeferenziati e metricamente affidabili.

Il rilievo metrico della Director's House



Figura 46: Loq AI con Director's House sullo sfondo (fonte: fotografia personale)

4.1 Acquisizione dei dati

A seguito di un rilievo 3D con drone condotto nel febbraio 2025 sull'intero campus Scripps Institution of Oceanography, finalizzato a supportare le operazioni di gestione e contribuire alla conservazione di strutture e paesaggi a rischio, si è estesa l'indagine a un singolo edificio, così da fornire una documentazione significativa e dimostrare l'utilità di sistemi centralizzati di dati per la conservazione.

Le operazioni di acquisizione ed elaborazione dei dati sono state svolte con la collaborazione del laboratorio Cultural Heritage Engineering Initiative (CHEI) della University of California San Diego, che ha supportato le attività di rilievo e le successive fasi di procesamiento dei dataset. Il contributo del laboratorio, attivo nei campi della documentazione 3D, della conservazione e delle scienze applicate al patrimonio, ha permesso l'integrazione di metodologie avanzate per la raccolta, la ricostruzione e l'archiviazione dei dati.

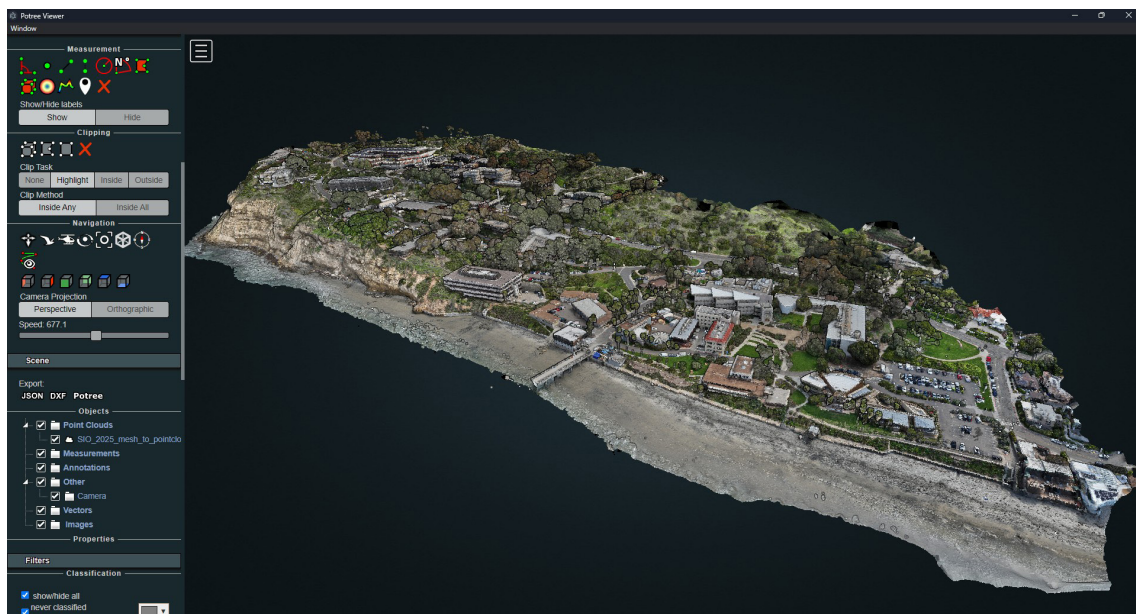


Figura 47: rilievo con drone dell'area della Scripps Institution of Oceanography, febbraio 2025 (fonte: screenshot da Potree Viewer)

Sono state impiegate tecniche topografiche, fotogrammetriche, TLS, GNSS e acquisizioni con sistemi innovativi come Looq AI.

Dopo aver recuperato il materiale storico, incluse le planimetrie dell'edificio dagli ar-

chivi della Scripps Institution of Oceanography, si è proceduto ad una prima ricognizione dell'edificio e dell'area circostante per capire come pianificare il rilievo e quante scansioni sarebbero state necessarie per coprire l'intero edificio, sia all'esterno che all'interno.

Si è proceduto inizialmente con il rilievo dell'esterno facendo uso del LiDAR terrestre Leica RTC360. Per la creazione di un modello denso di punti sono state eseguite 20 scansioni ad alta intensità, ciascuna della durata di circa 2 minuti e 42 secondi.

Dopo aver verificato di avere coperto l'intera area esterna dell'edificio, si è proseguito con il rilievo interno.

Partendo dal primo piano, per poi scendere al piano terra, sono state prodotte 49 scansioni, questa volta con impostazione a densità media, di circa 1 minuto e 51 secondi per scansione.

Terminate le scansioni interne ed esterne con il LiDAR terrestre Leica RTC 360, è stata utilizzata la fotocamera Sony A7R III per realizzare un'estesa campagna fotografica dell'edificio, sia all'esterno sia all'interno, includendo anche i pavimenti, così da acquisire il maggior numero possibile di informazioni cromatiche da applicare alle scansioni.

Oltre a migliorare la resa visiva del modello TLS, questa acquisizione ha permesso di disporre di un dataset fotogrammetrico completo, successivamente elaborato tramite pipeline Structure from Motion per generare ulteriori nuvole di punti, ortofoto e prodotti derivati integrati nel workflow di documentazione 3D.

Per completare il rilievo è poi stato utilizzato il sistema innovativo mobile mapping fotogrammetrico LooqAI.

Questo sistema, dotato di quattro camere da 5 MP e assistito da GNSS ha permesso di eseguire il rilievo seguendo il percorso iniziato all'esterno della struttura, proseguendo il perimetro della casa per poi entrare dalla porta principale e documentare ogni stanza, bagno, ripostiglio di ogni piano, con ritorno al punto di partenza.

Il rilievo con lo strumento LooqAI ha avuto una durata di circa 17 minuti.

4.2 Rilievo LiDAR terrestre (Leica RTC360)

Per il rilievo è stato impiegato il laser scanner terrestre Leica RTC360 di Leica Geosystems, uno degli strumenti più avanzati in commercio. Si tratta di un TLS (Terrestrial Laser Scanner) a tempo di volo (Time of Flight: TOF), capace di acquisire fino a 2 milioni di punti al secondo.

Lo strumento è dotato di un sistema di imaging sferico HDR composto da tre fotocamere da 36 MP, in grado di produrre immagini calibrate fino a 432 MP complessivi. Questo ha consentito di ottenere nuvole di punti arricchite da informazioni cromatiche di alta qualità, con un tempo di acquisizione di una scansione completa, comprensiva dell'immagine HDR, inferiore ai 2 minuti, garantendo così grande rapidità ed efficienza nelle campagne di rilievo.



Figura 48: Director's House, aprile 2025 (fonte: fotografia personale)

Elemento distintivo del RTC360 è il Visual Inertial System (VIS), un sistema inerziale-video che registra in tempo reale i movimenti dello scanner e permette l'allineamento automatico delle scansioni in campo, riducendo la necessità di target fisici e semplificando la fase di registrazione. Dal punto di vista prestazionale, lo strumento raggiunge una precisione del punto 3D di circa 1,9 mm a 10 m e 2,9 mm a 20 m, con un rumore di misura ridotto a 0,4 mm a 10 m.

Durante la fase operativa è stata sfruttata la connettività Wi-Fi tramite l'applicazione dedicata Cyclone FIELD 360, installata su dispositivi mobili. Questa piattaforma consente il controllo remoto delle scansioni, la visualizzazione in tempo reale dei dati e la registrazione di annotazioni direttamente in campo, ottimizzando il flusso di lavoro e riducendo i tempi di verifica.

Nel corso della campagna di rilievo è stato impiegato un iPad, che ha permesso di monitorare costantemente lo stato delle acquisizioni, individuare eventuali criticità e applicare, ove necessario, modifiche immediate ai parametri di scansione.

I dati sono stati archiviati su unità USB da 256 GB, in grado di garantire un'elevata capacità di registrazione e la massima sicurezza durante il trasferimento per le successive fasi di elaborazione.

Grazie a tutte queste caratteristiche, il Leica RTC360 rappresenta uno strumento estremamente versatile, capace di coniugare rapidità di acquisizione, precisione metrica e qualità cromatica, rivelandosi particolarmente adatto alla documentazione tridimensionale ad alta fedeltà nel campo del rilievo architettonico e del patrimonio culturale, come in questo caso.



Figura 49: Rilievo con RTC360, aprile 2025
(fonte: fotografia personale)



Figura 50: REGISTER 360 (fonte: Leica)

4.3 Looq AI

Il LooqAI scanner è un sistema di fotogrammetria terrestre mobile di nuova generazione, progettato per acquisizioni rapide e ad alta densità di dati. Il dispositivo è composto da quattro fotocamere che catturano simultaneamente immagini da diverse angolazioni, assicurando una copertura completa dell'ambiente circostante. Si collega a uno smartphone, dal quale riceve correzioni GNSS differenziali in tempo reale, migliorando così la precisione della georeferenziazione. La modalità di rilievo prevede un percorso “a serpentina” (snake-like pattern), caratterizzato da linee parallele distanziate di circa 3 metri, che garantiscono una copertura sistematica e uniforme dell'area.



*Figura 51: Rilievo con LooqAI, maggio 2025
(fonte: fotografia personale)*

Le immagini raccolte vengono elaborate tramite una pipeline fotogrammetrica proprietaria, che sfrutta la tecnica del bundle adjustment per ottimizzare i parametri interni ed esterni delle camere e stimare contemporaneamente le coordinate tridimensionali dei punti. Il risultato è una nuvola di punti georiferita ad alta densità, inizialmente generata nel sistema di riferimento ITRF2014 e successivamente trasformata in datum locali (ad esempio NAD83 per il piano orizzontale e NGVD29 per quello verticale).

Dal punto di vista prestazionale, il Looq AI scanner raggiunge una precisione orizzontale di circa 2–3 cm e una precisione verticale di 3–5 cm, rendendolo adatto a rilievi topografici e a diverse applicazioni di mappatura. Rispetto a metodi tradizionali come RTK-GPS o stazione totale, il principale vantaggio consiste nella capacità di produrre nuvole di punti estremamente dense e dettagliate, che descrivono con chiarezza non solo le superfici del terreno ma anche elementi verticali come cancelli, recinzioni, linee elettriche e altre strutture circostanti.

L'elevata risoluzione dei dati comporta una maggiore richiesta di memoria: i file prodot-

Il rilievo metrico della Director's House - Mobile mapping fotogrammetrico (Looq AI)

ti sono di dimensioni consistenti (nell'ordine dei gigabyte, anche per aree relativamente contenute), ma a fronte di questo aspetto il sistema garantisce un notevole vantaggio in termini di rapidità di acquisizione (milioni di punti al minuto) e di ricchezza informativa del modello tridimensionale.

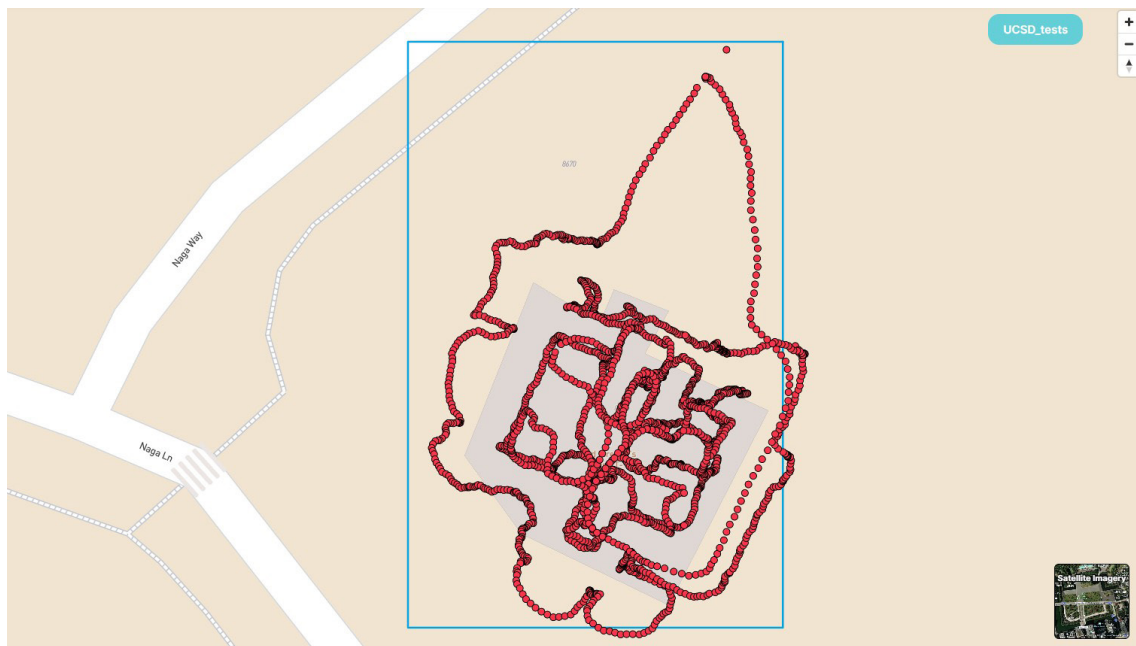


Figura 52: screenshot percorso a seppentina post-elaborazione (fonte: screenshot personale da Looq Platform)

L'elaborazione dei dati avviene in maniera automatizzata in cloud, dove viene generata una nuvola di punti 3D georiferita a risoluzione sub-centimetrica. Tutti i dati acquisiti e processati sono stati archiviati e tracciati, in modo da garantire la loro verificabilità anche in fasi successive. Le scansioni utilizzate per questo lavoro sono state elaborate con la versione 2.7.0 della piattaforma Looq AI.

Il sistema di coordinate adottato è stato:

Datum orizzontale: NAD83(2011)

Datum verticale: Ellissoidico

Epoch: data del rilievo (4 giugno 2025)

Proiezione: NAD83(2011) / UTM zona 11N – EPSG:6350

4.4 Acquisizione dati GNSS (Global Navigation Satellite System)

Per la georeferenziazione del modello integrato della Director's House è stata condotta una campagna GNSS ad alta precisione, svolta in collaborazione con il laboratorio Cultural Heritage Engineering Initiative (CHEI) della UC San Diego. Le attività hanno riguardato la verifica delle coordinate di controllo, l'integrazione delle traiettorie GNSS e la gestione dei flussi di elaborazione necessari per l'inquadrimento metrico del modello nel sistema di riferimento globale.



Figura 53: rilievo con GNSS Emlid Reach RS2, giugno 2025 (fonte: fotografia personale)



Figura 54: rilievo con GNSS Emlid Reach RS2, giugno 2025 (fonte: fotografia personale)

Il rilievo è stato eseguito in modalità RTK, in accordo con quanto descritto nel paragrafo 3.2.2, utilizzando un ricevitore Emlid Reach RS2, dispositivo multifrequenza progettato per rilievi ad alta precisione. Il RS2 è in grado di tracciare simultaneamente GPS/QZSS, GLONASS, Galileo e BeiDou su doppia frequenza (L1/L2, E1/E5b, B1/B2), garantendo una rapida convergenza (≈ 5 s) e una soluzione stabile anche in scenari con visibilità satellitare complessa. Dal punto di vista prestazionale, il raggiungimento di una soluzione RTK FIX è stato possibile grazie alle specifiche dichiarate dal produttore, pari a:

- Precisione RTK: 7 mm + 1 ppm (orizzontale), 14 mm + 1 ppm (verticale);

- Precisione statica: 4 mm + 0,5 ppm (orizzontale), 8 mm + 1 ppm (verticale);
- Precisione PPK: 5 mm + 0,5 ppm (orizzontale), 10 mm + 1 ppm (verticale).

Il ricevitore è stato collegato tramite protocollo NTRIP alla rete di stazioni permanenti della University of California San Diego, da cui ha ricevuto in tempo reale le correzioni differenziali necessarie alla risoluzione delle ambiguità di fase.

Sono stati materializzati e acquisiti 16 Ground Control Points (GCPs) distribuiti attorno all'edificio, posizionati per garantire un corretto inquadramento planimetrico e altimetrico. Per ogni punto sono state registrate le coordinate e scattate fotografie di supporto. Le misure sono state mantenute costantemente in soluzione RTK FIX, con un errore medio inferiore ai 2 cm.

L'intera campagna è stata gestita tramite l'applicazione Emlid Flow (ReachView) e ha avuto una durata complessiva di circa 4 ore. Dopo la prima acquisizione, la procedura è stata ripetuta due ore più tardi per un controllo incrociato; i punti della seconda sessione sono stati rinominati da 1 a 16 con suffisso a.

Durante il rilievo sono stati tracciati in media 37 satelliti, con un PDOP pari a 2.1. Le coordinate sono state espresse nel sistema WGS84 / UTM Zone 11N (EPSG:32611). Le misure sono state effettuate il 17 giugno 2025, con correzione differenziale in tempo reale rispetto a una stazione base situata entro 50 m.

Al termine delle operazioni, i dati sono stati verificati e corretti utilizzando le stazioni GNSS permanenti della Scripps Institution of Oceanography, situate presso il molo e sulla collina retrostante. Le coordinate finali sono state importate in Agisoft Metashape, associate ai marker del modello fotogrammetrico e utilizzate per migliorare significativamente la precisione spaziale del modello 3D integrato. Le informazioni complete relative ai GCPs sono riportate nella tabella della pagina successiva.

Acquisizione dati GNSS (Global Navigation Satellite System)

ID	Name	Est (m)	Nord (m)	Quota (m)
1	E back door	476338,529	3636460,925	-8,674
2	E far corner	476341,473	3636460,620	-8,753
3	NE building corner	476339,835	3636458,612	-8,699
4	E middle of roof	476337,215	3636453,439	-9,194
5	SE corner of the building	476335,160	3636449,564	-9,414
6	SE stairs front door	476333,114	3636447,964	-9,461
7	S pathway middle	476331,395	3636444,359	-9,628
8	S pathway end	476328,055	3636441,356	-10,194
9	S sprinkle	476328,847	3636447,014	-9,955
10	SW building wood square NE	476321,027	3636454,584	-11,019
11	SW building wood square NW	476319,749	3636455,873	-11,027
12	W monument NE corner (silver tip cover)	476316,746	3636462,435	-11,134
13	W sprinkle	476319,033	3636465,642	-10,734
14	W building corner drainage SW	476327,810	3636466,212	-10,024
15	NW corner	476330,919	3636467,144	-9,259
16	N back door NE corner	476337,633	3636463,591	-8,757

Figura 55: valori di georeferenziazione dei 16 punti acquisiti durante il rilievo, giugno 2025 (fonte: screenshot personale)

Longitudine (°)	Latitudine (°)	RMS (m)	Ora inizio (UTC-07)	σE (m)	σN (m)	σH (m)	Baseline (m)
-117,2529099	32,86600663	0,016	09:22:17	0,012	0,011	0,036	50,127
-117,2528785	32,86600394	0,015	09:25:03	0,01	0,011	0,019	50,237
-117,2528959	32,86598578	0,015	09:30:34	0,011	0,011	0,029	52,322
-117,2529238	32,86593906	0,016	09:35:14	0,012	0,011	0,018	57,709
-117,2529457	32,86590407	0,016	09:39:24	0,012	0,011	0,017	61,818
-117,2529675	32,86588959	0,016	09:43:45	0,011	0,012	0,021	63,687
-117,2529858	32,86585704	0,016	09:48:26	0,013	0,011	0,018	67,54
-117,2530214	32,86582987	0,015	09:53:00	0,011	0,01	0,019	71,179
-117,2530131	32,86588093	0,015	09:58:45	0,011	0,011	0,016	65,474
-117,2530968	32,86594905	0,016	10:05:14	0,011	0,011	0,016	60,661
-117,2531105	32,86596065	0,015	10:09:07	0,011	0,011	0,015	59,952
-117,2531428	32,86601977	0,015	10:15:01	0,011	0,011	0,016	55,412
-117,2531184	32,86604875	0,016	10:23:43	0,011	0,011	0,02	51,481
-117,2530246	32,86605408	0,016	10:28:37	0,011	0,011	0,017	47,355
-117,2529914	32,86606256	0,023	10:32:53	0,021	0,01	0,043	45,462
-117,2529196	32,86603066	0,015	10:37:39	0,011	0,011	0,015	47,569

Acquisizione dati GNSS (Global Navigation Satellite System)

ID	Name	Est (m)	Nord (m)	Quota (m)
1a	E back door	476338,504	3636460,928	-8,726
2a	E far corner	476341,478	3636460,651	-8,752
3a	NE building corner	476339,819	3636458,597	-8,738
4a	E middle of roof	476337,182	3636453,425	-9,206
5a	SE corner of the building	476335,140	3636449,575	-9,48
6a	SE Stair front door	476333,072	3636448	-9,392
7a	S pathway middle	476331,398	3636444,363	-9,607
8a	S pathway end	476328,091	3636441,386	-10,149
9a	S sprinkler	476328,83	3636447,046	-9,923
10a	SW building wood square NE	476321,579	3636454,726	-11,665
11a	SW building wood square NW	476319,79	3636455,824	-11,099
12a	W monument NE corner (silver tip corner)	476316,75	3636462,434	-11,143
13a	W sprinkler	476319,032	3636465,669	-10,827
14a	W building corner drainage SW	476327,793	3636466,325	-9,975
15a	NW corner	476330,956	3636467,195	-9,433
16a	N back door NE corner	476337,624	3636463,627	-8,777

Figura 56: valori di georeferenziazione dei 16 punti acquisiti durante il rilievo, giugno 2025 (fonte: screenshot personale)

Longitudine (°)	Latitudine (°)	RMS (m)	Ora inizio (UTC-07)	σE (m)	σN (m)	σH (m)	Baseline (m)
-117,2529102	32,86600665	0,015		0,01	0,011	0,016	50,136
-117,2528784	32,86600422	0,015		0,01	0,011	0,012	50,198
-117,2528961	32,86598565	0,015		0,011	0,011	0,015	52,331
-117,2529241	32,86593894	0,015		0,011	0,011	0,023	57,729
-117,2529459	32,86590417	0,019		0,013	0,014	0,028	61,808
-117,2529679	32,86588992	0,016		0,011	0,012	0,016	63,677
-117,2529857	32,86585707	0,015		0,011	0,011	0,015	67,539
-117,253021	32,86583015	0,02		0,016	0,011	0,02	71,136
-117,2530132	32,86588122	0,015		0,011	0,011	0,02	65,448
-117,253091	32,86595034	0,104		0,075	0,072	0,297	60,497
-117,2531101	32,86596021	0,063		0,06	0,017	0,065	59,942
-117,2531428	32,86601977	0,015		0,01	0,011	0,016	55,418
-117,2531185	32,866049	0,015		0,01	0,011	0,014	51,468
-117,2530248	32,8660551	0,018		0,011	0,014	0,031	47,268
-117,252991	32,86606302	0,015		0,01	0,011	0,012	45,418
-117,2529197	32,86603098	0,015		0,01	0,011	0,012	47,538

4.5 Elaborazione dati (Leica RTC360)

Una volta completata la fase di acquisizione attraverso lo strumento Leica RTC360, i dati sono stati elaborati tramite il software Leica Cyclone Register 360, fornito con licenza dedicata. Il workflow ha previsto innanzitutto l'importazione dei file in formato .lrm, generati dalle 20 scansioni esterne della Director's House. Questi dati hanno consentito la visualizzazione preliminare della nuvola di punti sia in pianta (2D) sia in ambiente tridimensionale, già arricchita dal colore acquisito durante le scansioni.

Un passaggio fondamentale ha riguardato la pulizia della nuvola di punti, con l'eliminazione degli elementi ritenuti superflui o poco accurati: porzioni di terreno e vegetazione circostante non pertinenti, punti a grande distanza con basso livello di affidabilità, nonché le aree vetrate delle finestre, soggette a riflessioni che generano disturbi e dati non corretti.

Successivamente, è stata eseguita la verifica dei collegamenti (link) tra le scansioni, creati automaticamente dal software in fase di importazione. Nei casi in cui l'allineamento non risultasse corretto, sono stati generati manualmente nuovi link tramite la funzione split view, selezionando almeno tre punti omologhi visibili in entrambe le scansioni. Questa operazione è stata ripetuta ogniqualvolta alcune scansioni risultassero non perfettamente allineate, aggiornando di conseguenza la registrazione. Particolare attenzione è stata posta alla verifica della sovrapposizione sufficiente tra le diverse scansioni, condizione necessaria per garantire l'accuratezza del modello finale.

Lo stesso procedimento è stato adottato per l'interno dell'edificio, con ulteriori accorgimenti: ad esempio, l'eliminazione delle porte aperte, che potevano creare falsi collegamenti tra ambienti adiacenti e compromettere la corretta ricostruzione spaziale.

Al termine delle operazioni di pulizia, verifica e registrazione, la nuvola di punti consolidata è stata considerata affidabile e coerente. Si è quindi proceduto all'esportazione dei dati nei formati .las ed .e57, utilizzando le opzioni di esportazione non strutturata, così da garantire la massima compatibilità con i software di elaborazione successivi.

Cyclone REGISTER 360 PLUS
Registration Report



May 7, 2025

Certified by:
Enrico Rocca
University of California San Diego



Job 001

Overall Quality

Error Results for Bundle 1

Setup Count: 69
Link Count: 73

Strength: 64 %
Overlap: 67 %
Global Bundle Error: 0.001 m

Bundle Error 0.002 m ✓	
Overlap 67 % ✓	Strength 64 % ✓
Cloud-to-Cloud	Target Error

Link Error Results

1 Overview

Link Name	Setup 1	Setup 2	Overlap	Abs. Mean Error
Link 1	Job 001- Setup 021	Job 001- Setup 022	72 %	0.001 m
Link 2	Job 001- Setup 022	Job 001- Setup 023	74 %	0.002 m
Link 3	Job 001- Setup 023	Job 001- Setup 024	22 %	0.008 m
Link 4	Job 001- Setup 025	Job 001- Setup 026	78 %	0.001 m
Link 5	Job 001- Setup 026	Job 001- Setup 027	33 %	0.004 m
Link 6	Job 001- Setup 029	Job 001- Setup 030	88 %	0.001 m
Link 7	Job 001- Setup 030	Job 001- Setup 031	84 %	0.001 m
Link 8	Job 001- Setup 032	Job 001- Setup 033	49 %	0.002 m
Link 9	Job 001- Setup 034	Job 001- Setup 035	70 %	0.002 m
Link 11	Job 001- Setup 037	Job 001- Setup 038	93 %	0.006 m
Link 12	Job 001- Setup 038	Job 001- Setup 039	91 %	0.005 m
Link 13	Job 001- Setup 039	Job 001- Setup 040	77 %	0.003 m
Link 15	Job 001- Setup 042	Job 001- Setup 043	78 %	0.003 m
Link 17	Job 001- Setup 044	Job 001- Setup 045	61 %	0.001 m
Link 18	Job 001- Setup 045	Job 001- Setup 046	54 %	0.002 m
Link 19	Job 001- Setup 046	Job 001- Setup 047	78 %	0.002 m
Link 20	Job 001- Setup 047	Job 001- Setup 048	88 %	0.001 m
Link 21	Job 001- Setup 048	Job 001- Setup 049	90 %	0.001 m
Link 22	Job 001- Setup 049	Job 001- Setup 050	90 %	0.002 m
Link 23	Job 001- Setup 051	Job 001- Setup 052	57 %	0.003 m
Link 24	Job 001- Setup 053	Job 001- Setup 054	82 %	0.002 m
Link 25	Job 001- Setup 054	Job 001- Setup 055	91 %	0.001 m
Link 26	Job 001- Setup 055	Job 001- Setup 056	79 %	0.001 m
Link 27	Job 001- Setup 056	Job 001- Setup 057	80 %	0.002 m
Link 28	Job 001- Setup 058	Job 001- Setup 059	56 %	0.001 m
Link 29	Job 001- Setup 059	Job 001- Setup 060	68 %	0.001 m
Link 30	Job 001- Setup 060	Job 001- Setup 061	43 %	0.001 m
Link 31	Job 001- Setup 061	Job 001- Setup 062	47 %	0.001 m
Link 32	Job 001- Setup 062	Job 001- Setup 063	72 %	0.001 m
Link 33	Job 001- Setup 063	Job 001- Setup 064	60 %	0.001 m
Link 34	Job 001- Setup 064	Job 001- Setup 065	71 %	0.004 m
Link 35	Job 001- Setup 063	Job 001- Setup 069	68 %	0.001 m
Link 36	Job 001- Setup 021	Job 001- Setup 028	58 %	0.002 m
Link 37	Job 001- Setup 063	Job 001- Setup 068	56 %	0.002 m
Link 39	Job 001- Setup 067	Job 001- Setup 068	38 %	0.003 m
Link 40	Job 001- Setup 028	Job 001- Setup 032	61 %	0.001 m
Link 41	Job 001- Setup 028	Job 001- Setup 030	28 %	0.002 m
Link 42	Job 001- Setup 068	Job 001- Setup 069	57 %	0.001 m

Il rilievo metrico della Director's House - Elaborazione dati (Leica RTC 360)

Link 43	Job 001- Setup 060	Job 001- Setup 056	47 %	0.002 m
Link 44	Job 001- Setup 068	Job 001- Setup 066	84 %	0.002 m
Link 45	Job 001- Setup 045	Job 001- Setup 053	69 %	0.002 m
Link 46	Job 001- Setup 051	Job 001- Setup 046	49 %	0.002 m
Link 47	Job 001- Setup 042	Job 001- Setup 036	52 %	0.002 m
Link 49	Job 001- Setup 022	Job 001- Setup 025	96 %	0.002 m
Link 50	Job 001- Setup 036	Job 001- Setup 041	85 %	0.001 m
Link 51	Job 001- Setup 036	Job 001- Setup 037	15 %	0.000 m
Link 52	Job 001- Setup 036	Job 001- Setup 039	14 %	0.000 m
Link 53	Job 001- Setup 034	Job 001- Setup 033	93 %	0.001 m
Link 54	Job 001- Setup 021	Job 001- Setup 036	77 %	0.003 m
Link 55	Job 001- Setup 035	Job 001- Setup 033	69 %	0.002 m
Link 56	Job 001- Setup 044	Job 001- Setup 043	40 %	0.002 m
Link 57	directors_house_exterior	directors_house_exterior-2	37 %	0.005 m
Link 58	directors_house_exterior	directors_house_exterior-3	86 %	0.002 m
Link 59	directors_house_exterior-2	directors_house_exterior-18	34 %	0.011 m
Link 60	directors_house_exterior-3	directors_house_exterior-4	83 %	0.002 m
Link 61	directors_house_exterior-4	directors_house_exterior-5	80 %	0.002 m
Link 62	directors_house_exterior-5	directors_house_exterior-6	83 %	0.007 m
Link 63	directors_house_exterior-6	directors_house_exterior-7	95 %	0.002 m
Link 64	directors_house_exterior-6	directors_house_exterior-9	83 %	0.002 m
Link 65	directors_house_exterior-7	directors_house_exterior-8	75 %	0.001 m
Link 66	directors_house_exterior-9	directors_house_exterior-10	79 %	0.001 m
Link 67	directors_house_exterior-10	directors_house_exterior-11	45 %	0.002 m
Link 68	directors_house_exterior-11	directors_house_exterior-12	56 %	0.002 m
Link 69	directors_house_exterior-12	directors_house_exterior-13	81 %	0.002 m
Link 70	directors_house_exterior-14	directors_house_exterior-15	82 %	0.003 m
Link 71	directors_house_exterior-15	directors_house_exterior-16	82 %	0.002 m
Link 72	directors_house_exterior-16	directors_house_exterior-17	53 %	0.002 m
Link 73	directors_house_exterior-17	directors_house_exterior-18	80 %	0.002 m
Link 74	directors_house_exterior-18	directors_house_exterior-19	82 %	0.000 m
Link 75	directors_house_exterior-19	directors_house_exterior-20	82 %	0.000 m
Link 76	Job 001- Setup 052	directors_house_exterior-8	52 %	0.002 m
Link 77	directors_house_exterior-13	directors_house_exterior-14	87 %	0.002 m
Link 78	Job 001- Setup 063	directors_house_exterior-2	55 %	0.001 m

2 Details

4.6 Elaborazione e gestione delle nuvole di punti

Terminata la fase di acquisizione, che ha previsto l'integrazione di rilievi fotogrammetrici, scansioni laser e misure GNSS, si è avviato il processo di elaborazione digitale attraverso il software Agisoft Metashape Professional. L'intero workflow è stato impostato secondo una sequenza metodica e progressiva, necessaria per gestire un dataset complesso e articolato come quello relativo alla Director's House della Scripps Institution of Oceanography.

Sono state innanzitutto caricate tutte le immagini ottenute con la fotocamera Sony A7R III, caratterizzata da un'eccellente resa cromatica. Metashape ha riconosciuto automaticamente i metadati EXIF, informazioni utili per comprendere le condizioni di acquisizione, anche se non ancora sufficienti per garantire un sistema di riferimento metrico interno. L'importazione costituisce la base per predisporre le fotografie all'allineamento successivo, permettendo al software di individuare con precisione i punti caratteristici presenti nelle immagini.

La fase successiva ha riguardato l'allineamento fotografico. Metashape analizza automaticamente ogni immagine identificando migliaia di punti caratteristici locali, che vengono poi messi in corrispondenza con quelli delle altre fotografie. Da questi abbinamenti derivano i cosiddetti tie points, ovvero punti omologhi che il software triangola nello spazio tridimensionale. I punti con errore di riproiezione più elevato vengono esclusi, mentre quelli più affidabili contribuiscono alla definizione della nuvola sparsa, che rappresenta l'ossatura preliminare del modello 3D e l'orientamento del blocco fotogrammetrico.

Parallelamente al dataset fotografico sono state importate le 69 scansioni laser acquisite con il Leica RTC360.

La mole dei dati, combinata all'elevata risoluzione delle immagini, ha inizialmente determinato tempi di calcolo lunghi e alcune instabilità del software durante la generazione della nuvola densa e della mesh. Per migliorare stabilità e qualità dei risultati si è scelto di procedere attraverso un workflow ottimizzato:

In una prima fase le scansioni TLS sono state utilizzate come base geometrica princi-

pale, disattivando temporaneamente le immagini fotografiche. Questo ha permesso al software di costruire un modello coerente e stabile sfruttando l'affidabilità metrica del dato LiDAR. Una volta consolidato il modello tridimensionale, le fotografie sono state riattivate nella fase di texturizzazione, in modo da ottenere un prodotto finale che unisse la precisione geometrica del laser scanner alla qualità cromatica delle immagini.

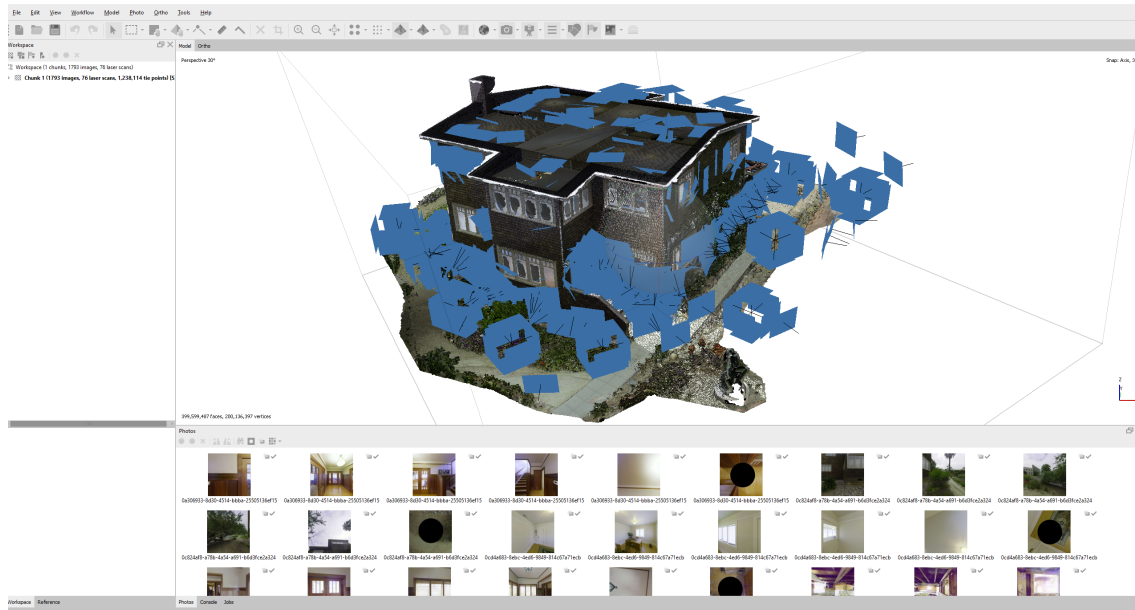


Figura 60: allineamento fotografico (fonte: screenshot Agisoft Metashape)

Un passaggio cruciale del workflow è stato quello della georeferenziazione. Il 17 giugno 2025 sono stati rilevati 16 punti di controllo tramite GNSS, ciascuno misurato due volte a distanza di circa due ore per ridurre gli scarti casuali. La media aritmetica delle due osservazioni è stata utilizzata per ottenere una coordinata finale più stabile. Le coordinate, espresse nel sistema NAD83 / UTM Zone 11N (EPSG:26911), sono state organizzate in un file CSV contenente gli attributi Est, Nord e Quota.

Una volta importato il file in Metashape, il software ha generato automaticamente un marker per ciascun punto. Questi marker sono poi stati posizionati manualmente sulle immagini, verificando e correggendo la loro proiezione in ogni vista utile.

Il posizionamento dei marker è avvenuto attraverso una combinazione di suggerimenti automatici del software e interventi manuali. Quando Metashape individua una posizione stimata del marker nelle immagini, questo viene mostrato con una bandierina bianca:

tale posizione rappresenta una stima che necessita però di conferma. Il posizionamento definitivo viene ottenuto manualmente, selezionando con precisione la posizione esatta del marker all'interno di ciascuna immagine dove esso risulta ben visibile; in questo caso la bandierina diventa verde.

Import CSV

Coordinate System

NAD83 / UTM zone 11N (EPSG::26911)

Rotation angles:

Yaw, Pitch, Roll

☐ Ignore labels

Threshold (m): 0.1

Delimiter

☐ Tab
☒ Semicolon
☐ Comma
☐ Space
☐ Other:
☐ Combine consecutive delimiters

Columns

Label: 1

Accuracy

Rotation

Accuracy

Easting: 2

8

Yaw: 5

9

Northing: 3

8

Pitch: 6

9

Altitude: 4

8

Roll: 7

9

☐ Enabled flag: 10

Start import at row: 1

Items: All

First 20 lines preview:

	Label	Easting	Northing	Altitude
1	Label	X	Y	Z
2	1	476338,517	3636460,927	-8,700
3	2	476341,476	3636460,636	-8,753
4	3	476339,827	3636458,605	-8,719
5	4	476337,199	3636453,432	-9,200
6	5	476335,150	3636449,570	-9,447
7	6	476333,093	3636447,982	-9,424
8	7	476331,397	3636444,361	-9,618
9	8	476328,073	3636441,371	-10,715
10	9	476328,839	3636447,030	-9,939
11	10	476321,303	3636454,655	-11,342
12	11	476319,770	3636455,849	-11,063
13	12	476316,748	3636462,435	-11,139
14	13	476319,033	3636465,656	-10,781
15	14	476327,802	3636466,269	-10,000
16	15	476330,938	3636467,170	-9,346
17	16	476337,629	3636463,609	-8,767

OK

Cancel

Figura 61: import file .csv su Metashape (fonte: screenshot Agisoft Metashape)

Una parte dei marker è stata utilizzata come control points, fondamentali per ancorare il modello al sistema di riferimento reale. Altri punti sono stati invece classificati come check points, non impiegati nell'ottimizzazione ma necessari per verificare l'accuratezza finale del modello. La loro distribuzione è stata organizzata in modo da coprire l'intero edificio e garantire una verifica omogenea delle deformazioni residue.



Figura 62: individuazione dei marker (fonte: screenshot Agisoft Metashape)



Figura 63: individuazione dei marker (fonte: screenshot Agisoft Metashape)

Una volta posizionati i marker, l'intero modello è stato sottoposto all'ottimizzazione tramite lo strumento Optimize Camera Alignment. Tutti i parametri di distorsione interna, centratura e focali sono stati attivati, insieme alle correzioni aggiuntive, in modo da ridurre le discrepanze e migliorare la coerenza geometrica del blocco fotogrammetrico. Questa fase ha prodotto un abbassamento significativo dell'errore medio dei marker e

Il rilievo metrico della Director's House - Elaborazione e gestione delle nuvole di punti

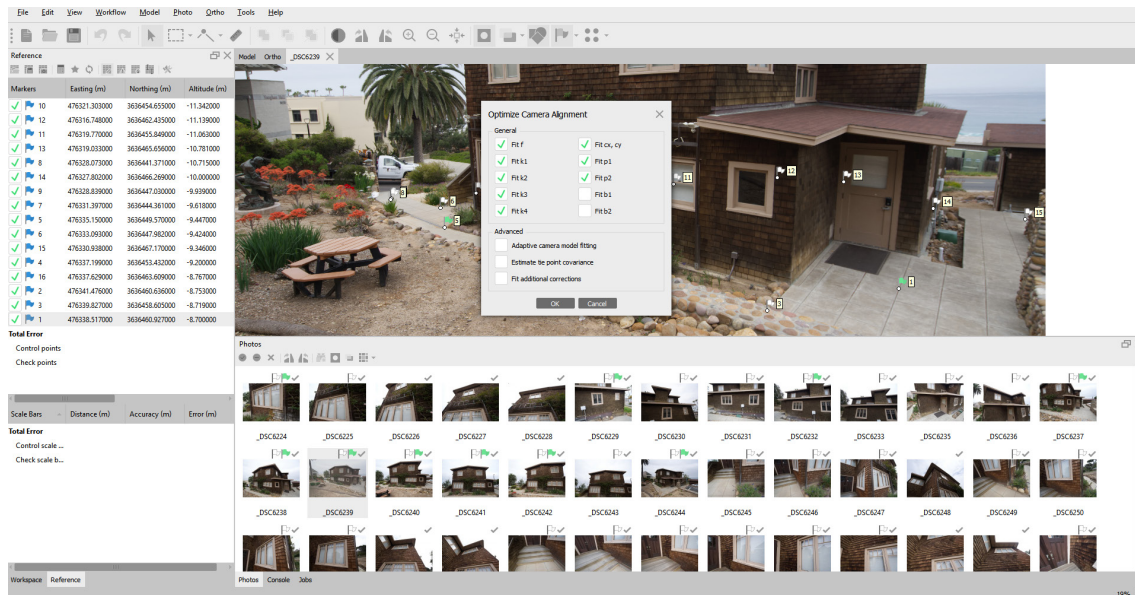


Figura 64: optimize camera alignment (fonte: screenshot Agisoft Metashape)

A seguito dell'ottimizzazione è stata condotta una valutazione approfondita dell'accuratezza dei marker, analizzando i valori di errore associati ai singoli punti e la coerenza complessiva tra control points e check points. La tabella prodotta da Metashape evidenzia che la maggior parte dei marker presenta un errore di riproiezione compreso tra 0.08 e 0.50 pixel, intervallo compatibile con un modello tridimensionale stabile e ben calibrato. Le leggere variazioni osservate tra un punto e l'altro possono essere attribuite alle differenti condizioni di visibilità nelle immagini, ai cambi di prospettiva o a piccole interferenze legate agli elementi architettonici e vegetazionali presenti intorno alla Director's House.

Un dato particolarmente significativo riguarda la prossimità tra l'errore medio dei control points (pari a 0.351 pixel) e quello dei check points (pari a 0.384 pixel). Il fatto che i punti utilizzati esclusivamente per la verifica, e quindi non coinvolti nell'ottimizzazione, restituiscano valori molto vicini a quelli dei punti di controllo rappresenta un indicatore evidente della solidità globale del modello. L'aderenza tra i due gruppi di punti conferma l'assenza di deformazioni localizzate e testimonia una distribuzione coerente dei vincoli metrici lungo tutto il perimetro dell'edificio.

Dal punto di vista metrico, i valori dell'errore spaziale risultano altrettanto positivi: i control points mostrano un errore medio pari a 0.042 m, mentre i check points registra-

no un valore di 0.037 m. Entrambi i risultati rientrano negli intervalli attesi e denotano una georeferenziazione stabile.

Markers		Easting (m)	Northing (m)	Altitude (m)	Accuracy (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
✓	1	476338.517000	3636460.927000	-8.700000	0.005000	0.054250	6	0.447
	2	476341.476000	3636460.636000	-8.753000	0.005000	0.024692	3	0.084
	3	476339.827000	3636458.605000	-8.719000	0.005000	0.027884	7	0.446
✓	4	476337.199000	3636453.432000	-9.200000	0.005000	0.049038	6	0.334
✓	5	476335.150000	3636449.570000	-9.447000	0.005000	0.029253	4	0.339
	6	476333.093000	3636447.982000	-9.424000	0.005000	0.022445	6	0.381
✓	7	476331.397000	3636444.361000	-9.618000	0.005000	0.030342	8	0.267
✓	8	476328.073000	3636441.371000	-10.715000	0.005000	0.012451	5	0.311
✓	9	476328.839000	3636447.030000	-9.939000	0.005000	0.027618	5	0.132
✓	10	476321.303000	3636454.655000	-11.342000	0.005000	0.045982	5	0.398
✓	11	476319.770000	3636455.849000	-11.063000	0.005000	0.075284	5	0.545
✓	12	476316.748000	3636462.435000	-11.139000	0.005000	0.008410	5	0.236
✓	13	476319.033000	3636465.656000	-10.781000	0.005000	0.026997	3	0.508
	14	476327.802000	3636466.269000	-10.000000	0.005000	0.061494	5	0.403
✓	15	476330.938000	3636467.170000	-9.346000	0.005000	0.046954	5	0.287
✓	16	476337.629000	3636463.609000	-8.767000	0.005000	0.051676	5	0.113
Total Error								
Control points						0.042327		0.351
Check points						0.037658		0.384

Figura 65: total error markers (fonte: screenshot Agisfot Metashape)

Consolidata la fase di orientamento, è stato avviato un batch process dedicato alla costruzione della Dense Cloud, alla generazione delle Depth Maps e alla creazione del Mesh Model. Durante questa fase, che rappresenta il cuore dell'elaborazione, il software ha sfruttato sia la matrice fotografica sia la geometria delle scansioni laser, producendo un modello tridimensionale dettagliato e perfettamente georeferenziato.

Consolidata la fase di orientamento, è stato avviato un batch process dedicato alla costruzione della Dense Cloud, alla generazione delle Depth Maps e alla creazione del Mesh Model. Durante questa fase, che rappresenta il cuore dell'elaborazione, il software ha sfruttato sia la matrice fotografica sia la geometria delle scansioni laser, producendo un modello tridimensionale dettagliato e perfettamente georeferenziato.

Il rilievo metrico della Director's House - Elaborazione e gestione delle nuvole di punti

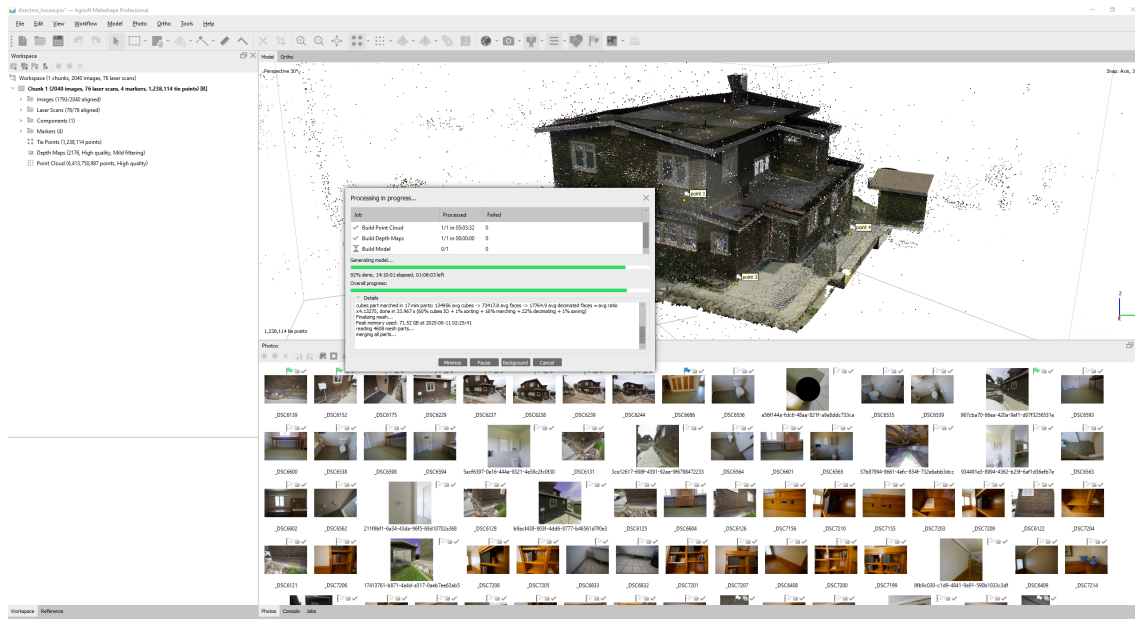


Figura 66: batch process (fonte: screenshot Agisoft Metashape)

Parallelamente all'utilizzo di Agisoft Metashape, durante la fase di elaborazione dei dati è stato sperimentato anche il software RealityCapture (Capturing Reality, Epic Games), anch'esso basato su algoritmi di Structure from Motion (SfM) e particolarmente noto per la sua rapidità di calcolo e l'efficienza nella gestione di dataset fotografici di grandi dimensioni.

Il workflow seguito ha previsto l'importazione delle immagini acquisite con la fotocamera Sony A7R III e l'allineamento automatico, che in questo caso è risultato sensibilmente più rapido rispetto a Metashape. Successivamente sono state integrate le scansioni laser provenienti dal Leica RTC360, con l'obiettivo di ottenere un modello 3D che combinasse dati fotogrammetrici e dati LiDAR. In questa fase è stato possibile verificare la buona compatibilità del software con i file di tipo .e57, derivati dal rilievo laser scanner, e la generazione di una mesh texturizzata in tempi ridotti rispetto al software concorrente.

Tuttavia, sebbene RealityCapture abbia mostrato indubbi vantaggi in termini di velocità di elaborazione e ottimizzazione delle risorse hardware, sono emerse alcune criticità. In particolare, la fase di georeferenziazione del modello ha presentato maggiori difficoltà rispetto a Metashape, poiché l'inserimento e la gestione dei Ground Control Points (GCPs) non risultano altrettanto intuitivi e flessibili. Inoltre, l'interfaccia del software,

seppur molto orientata all'automazione, limita in parte il controllo puntuale dei singoli processi, rendendo più complesso l'adattamento del workflow a dataset eterogenei come quello utilizzato in questo progetto (fotografie ad alta risoluzione integrate a scansioni laser).

Per queste ragioni, nonostante le prestazioni più elevate in termini di tempo di calcolo, si è deciso di proseguire l'elaborazione principale con Agisoft Metashape, che ha garantito maggiore stabilità operativa, una gestione più accurata della georeferenziazione e, soprattutto, una migliore possibilità di controllo sulle diverse fasi di elaborazione del modello.

Infine, si è poi esportato il file da Metashape in formato .las per una visualizzazione interattiva più approfondita sul software Potree, una piattaforma open-source basata su WebGL che consente di esplorare e analizzare nuvole di punti 3D direttamente da browser, offrendo strumenti di misura, controllo dei livelli e gestione dei dati RGB e geometrici.

Il rilievo metrico della Director's House - Elaborazione e gestione delle nuvole di punti

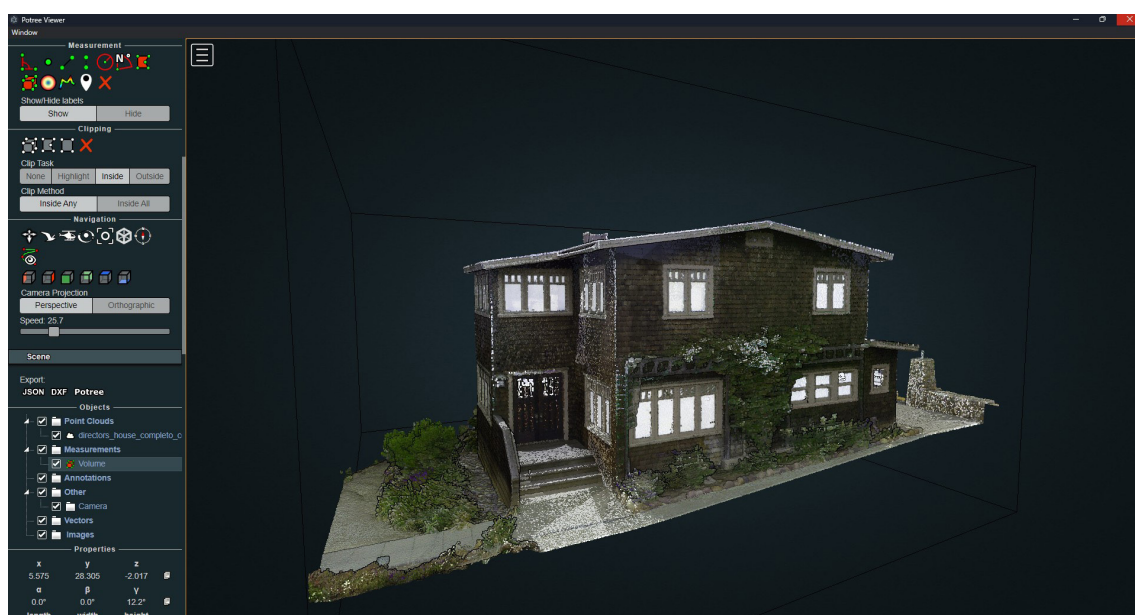


Figura 67: modello 3D completo (fonte: screenshot Potree Viewer)



Figura 68: sezione del modello 3D completo (fonte: screenshot Potree Viewer)

Il rilievo metrico della Director's House - Elaborazione e gestione delle nuvole di punti

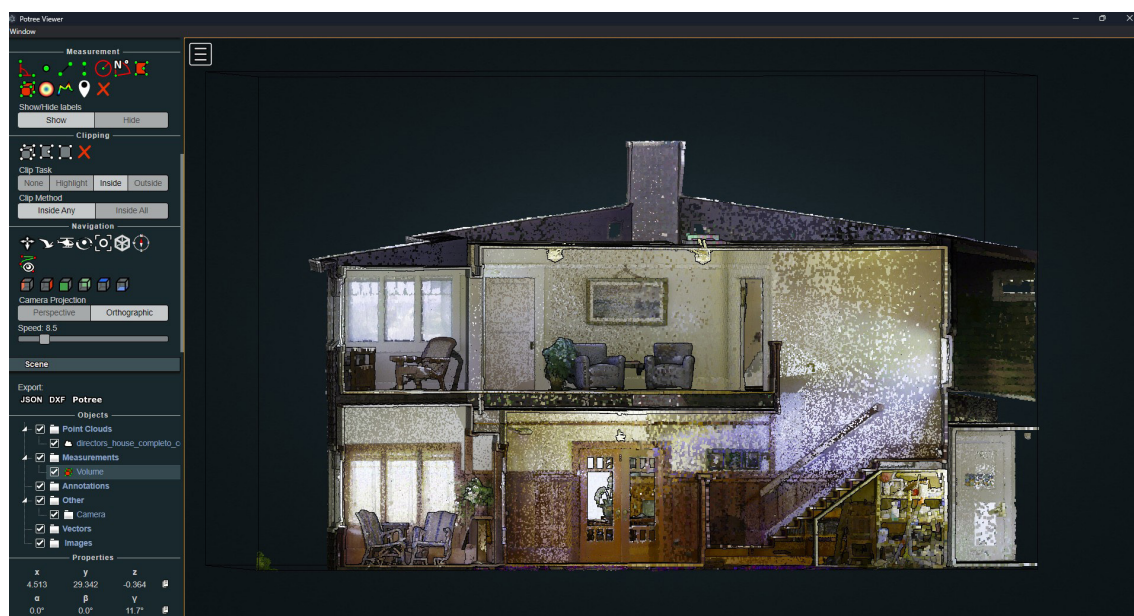


Figura 69: sezione del modello 3D completo (fonte: screenshot Potree Viewer)



Figura 70: sezione del modello 3D completo (fonte: screenshot Potree Viewer)

4.7 Risultati e confronto tra dataset

Dopo l'importazione in CloudCompare delle nuvole di punti provenienti dai rilievi effettuati con Looq e con RTC360, è stata eseguita una segmentazione preliminare dei modelli. In particolare, per entrambe le nuvole sono stati separati il piano terra e il primo piano, escludendo sistematicamente la porzione del tetto al fine di facilitare le successive fasi di confronto tra i dataset.

Completata la segmentazione, si è proceduto con la fase di allineamento utilizzando lo strumento Point Pairs Picking di CloudCompare. Questa funzione consente la registrazione di due nuvole di punti attraverso la selezione manuale di almeno tre punti corrispondenti tra i modelli. Per aumentare la precisione dell'allineamento, in entrambi i casi sono stati scelti cinque punti, distribuiti nello spazio in maniera il più possibile uniforme.

Da come si può vedere nelle due immagini alla pagina successiva, il primo allineamento è stato eseguito sulle nuvole di punti corrispondenti al piano terra, ottenendo un valore di $RMS = 0,023$ mm, corrispondente a un errore medio inferiore a 2,5 cm. Tale risultato è stato considerato soddisfacente per gli scopi di confronto geometrico tra i due dataset.

(RMS – Root Mean Square Error – è un indicatore che misura la corrispondenza tra due nuvole di punti dopo l'allineamento).

La stessa procedura è stata successivamente applicata al primo piano, con un risultato di $RMS = 0,010$ mm, pari a un errore medio di poco superiore a 1 cm. Questo dato conferma la buona coerenza metrica tra i due modelli 3D anche al livello superiore.

L'analisi è poi proseguita con l'utilizzo di Potree, piattaforma che consente la visualizzazione interattiva delle nuvole di punti. Sono stati importati i file in formato .las, comprendenti sia il modello acquisito con la tecnologia Looq AI (di natura fotogrammetrica), sia quello generato tramite il laser scanner RTC360.

Questa operazione ha reso possibile un confronto diretto della qualità dei risultati ottenuti con le due differenti tecniche di rilievo. Il modello Looq pur distinguendosi per l'elevata qualità cromatica, caratteristica tipica dei prodotti fotogrammetrici, presenta criticità di natura geometrica: la nuvola di punti appare infatti rumorosa, con distribuzio-

ne irregolare e presenza di punti sparsi caratterizzati da minore affidabilità.



Il rilievo metrico della Director's House - Risultati e confronto tra dataset



Figura 73: piano terreno modello RTC360
(fonte: screenshot Potree Viewer)

Figura 74: piano terreno modello Looq AI
(fonte: screenshot Potree Viewer)

Le due immagini (a sinistra RTC360, a destra Looq AI) evidenziano le differenze già descritte tra i modelli ottenuti con i due sistemi di rilievo, riferite al piano terreno della Director's House. Successivamente, sono riportati i risultati relativi al piano primo, per un confronto analogo tra le due acquisizioni.

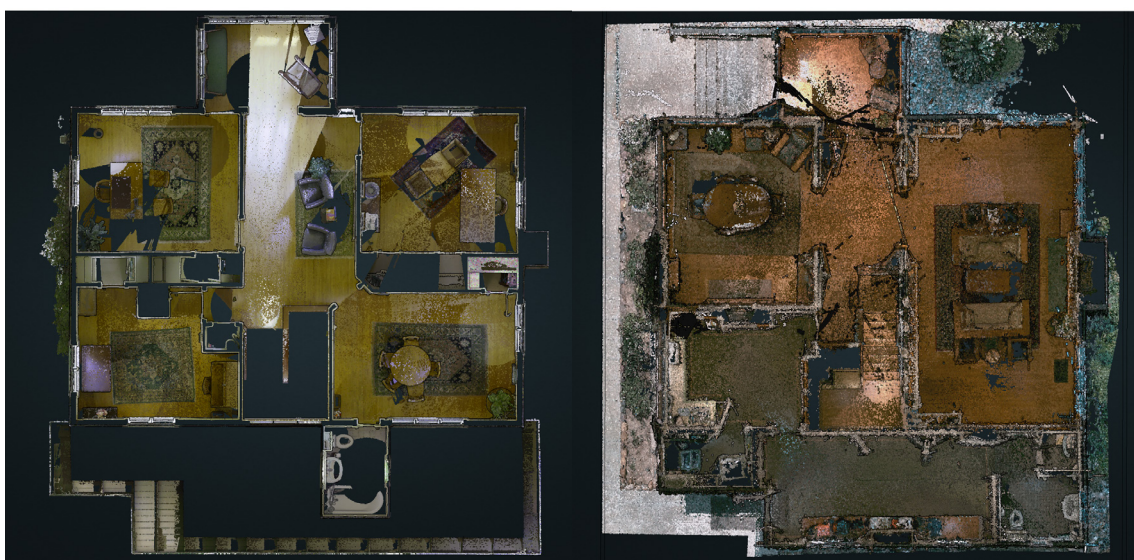


Figura 75: piano primo modello RTC360
(fonte: screenshot Potree Viewer)

Figura 76: piano primo modello Looq AI
(fonte: screenshot Potree Viewer)

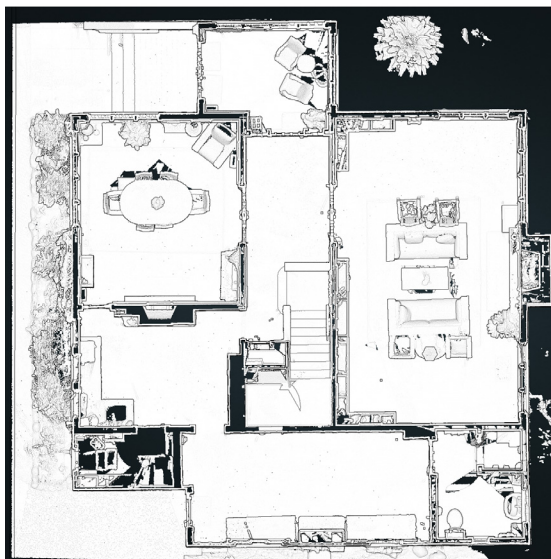


Figura 77: piano terreno modello RTC360
(fonte: screenshot Potree Viewer)



Figura 78: piano terreno modello Looq AI
(fonte: screenshot Potree Viewer)

Nelle quattro immagini seguenti, sempre relative al piano terreno e al piano primo è stata modificata la scala cromatica, su tonalità bianca per evidenziare in modo più leggibile il livello di rumorosità della nuvola di punti del modello Looq AI, la cui definizione e struttura risultano pertanto meno accurate.



Figura 79: piano primo modello RTC360
(fonte: screenshot Potree Viewer)



Figura 80: piano primo modello Looq AI
(fonte: screenshot Potree Viewer)

Il rilievo metrico della Director's House - Risultati e confronto tra dataset

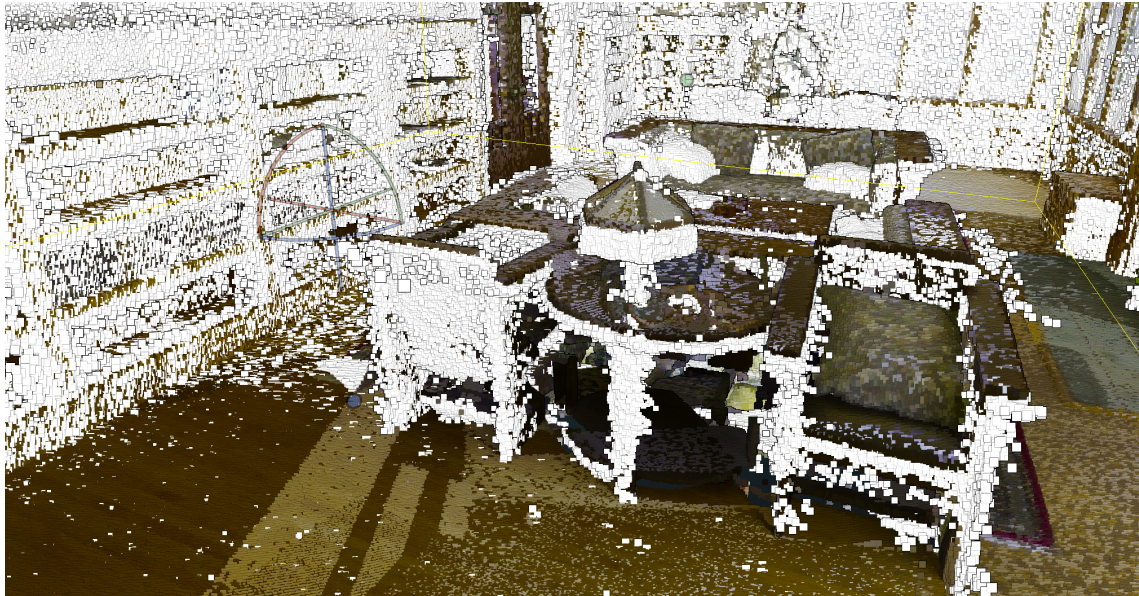


Figura 81: sovrapposizione modello RTC360 (RGB) con Looq AI (bianco) (fonte: screenshot Potree Viewer)

In queste due immagini conclusive sono riportati due screenshot estratti da viste interne, una al piano terreno e una al piano primo, in cui è possibile osservare, in colorazione RGB, il modello acquisito con RTC360, e in tonalità bianca quello derivante dalla scansione effettuata con Looq AI.

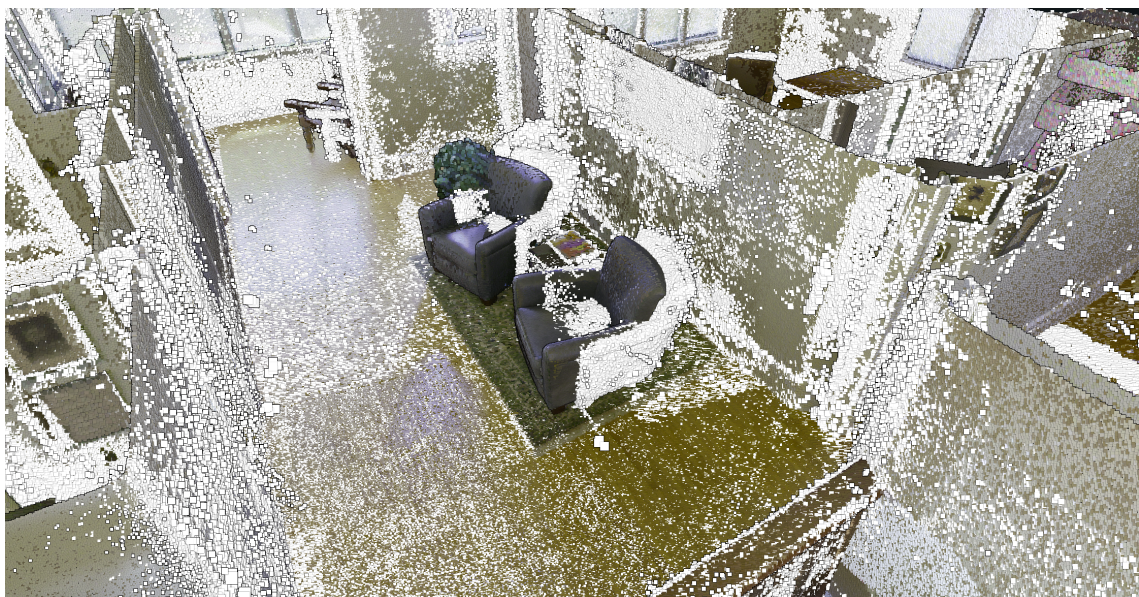


Figura 82: sovrapposizione modello RTC360 (RGB) con Looq AI (bianco) (fonte: screenshot Potree Viewer)

BIM & HBIM

5.1 Introduzione al BIM

I tempi di una rivoluzione possono essere lunghi, ma quando essa si compie, è come entrare in un nuovo mondo: «quando mutano i paradigmi, il mondo stesso cambia con essi». È il paradigma — il punto di vista, il quadro concettuale, il “mondo” — a risultare mutato.

Con il cambiamento di paradigma occorre ripensare tutto: concetti fondamentali, metodi, problemi. Il passaggio da un paradigma all'altro segna una trasformazione profonda nel modo di interpretare la realtà. I dati possono anche restare gli stessi, ma vengono letti in modo diverso, inseriti in nuove relazioni che modificano il significato complessivo del sistema di conoscenza. Il nuovo paradigma, una volta affermato, si estende progressivamente a ogni disciplina e campo del sapere, inaugurando una nuova fase di “scienza normale”, fino a quando, inevitabilmente, anche questo non genera anomalie e interrogativi che ne preparano la sostituzione.

Con questa riflessione di Thomas Kuhn, tratta da *La struttura delle rivoluzioni scientifiche* (1962), si può efficacemente descrivere il traguardo raggiunto dall'evoluzione metodologica, grafica e informatica del BIM.

Nell'acronimo, la sigla BI, Building Information, rappresenta la componente essenziale del processo: la costruzione di un modello geometrico i cui elementi contengono informazioni alfanumeriche, cioè dati descrittivi, materici e funzionali. La lettera M invece può assumere tre diverse interpretazioni, ognuna delle quali evidenzia una sfumatura del processo BIM:

1. Building Information Model

Indica il modello informativo digitale parametrico che integra informazioni geometriche e alfanumeriche, utili per la gestione dell'intero ciclo di vita dell'edificio o dell'opera.

2. Building Information Modeling

Si riferisce all'attività o metodologia di lavoro che prevede la creazione di modelli informativi, secondo procedure collaborative e coordinate tra le diverse discipline coinvolte.

3. Building Information Management

Identifica la gestione dei flussi di lavoro nelle varie fasi — progettuale, costruttiva, manutentiva e di dismissione — dell'edificio o dell'opera.

In base a queste definizioni, si può chiarire che il BIM non coincide con un semplice modello digitale, ma rappresenta un processo complesso e integrato. Esso si avvale di una pluralità di software che consentono di creare modelli, vere e proprie rappresentazioni digitali, in cui le informazioni grafiche, alfanumeriche, fisiche e funzionali di una costruzione vengono correlate e gestite in maniera dinamica e coordinata.

5.1 Alcuni cenni storici

Le radici del BIM affondano nelle prime sperimentazioni di interazione grafica uomo-macchina degli anni Sessanta. Con Sketchpad (MIT), Ivan Sutherland dimostra per la prima volta la possibilità di “conversare” con il calcolatore attraverso disegni tracciati direttamente sullo schermo, aprendo la strada a un uso progettuale della grafica computerizzata e alle future interfacce grafiche (GUI).



Figura 83: Sutherland al lavoro con il suo Sketchpad

Parallelamente, tra anni '50 e '60, l'industria introduce i primi sistemi CADD/CAM e la nozione di computer graphics; nel 1964 la General Motors presenta DAC-I, mentre nel decennio successivo maturano i primi approcci alla modellazione 3D. Due filiere risultano decisive: la modellazione solida CSG (basata su primitive e operazioni booleane)

e la B-Rep (Boundary Representation), sviluppata a Cambridge, che descrive gli oggetti tramite facce, spigoli e vertici con più ricche operazioni di editing. Queste innovazioni spostano l'attenzione dal "disegno" al "modello".

In questo contesto, Charles M. Eastman formalizza il salto concettuale: nel 1974 propone il Building Description System (BDS), un modello computazionale che unifica geometrie, spazi e proprietà come in un database, con aggiornamento coerente degli elaborati; nel 1975 ne illustra l'uso "al posto dei disegni" sull'AIA Journal. Questi contributi anticipano la logica informativa e oggetti-centrica tipica del BIM contemporaneo. Gli anni Ottanta segnano la diffusione commerciale: accanto ai CAD generalisti (AutoCAD, MicroStation, Allplan) emergono piattaforme che prefigurano il "virtual building". RUCAPS viene impiegato per Heathrow T3 con componenti "intelligenti" coordinati; ArchiCAD (evoluzione di Radar CH, 1984) introduce in ambiente architettonico il lavoro 2D/3D su oggetti parametrici e librerie, anticipando molte pratiche BIM. Nello stesso periodo, nell'ingegneria meccanica, Pro/ENGINEER consolida la modellazione parametrica feature-based e l'"history tree".

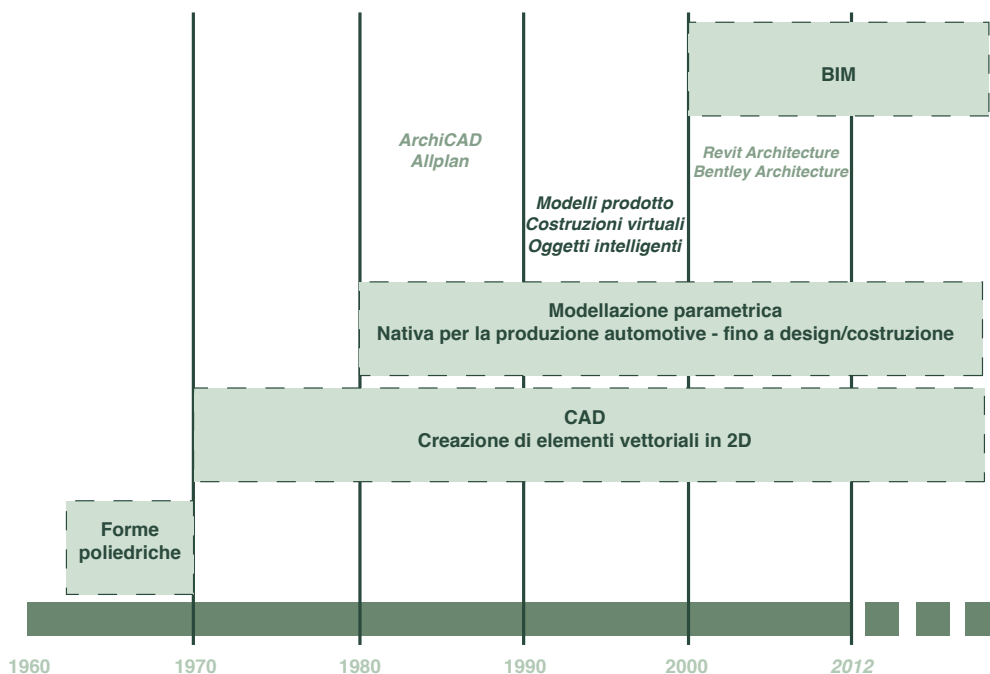


Figura 84: sviluppo di metodologie innovative (fonte: rielaborazione personale)

Negli anni Novanta, mentre la ricerca accademica elabora i concetti di “virtual building” e product/aspect models, van Nederveen & Tolman (1992) pubblicano uno dei primi riferimenti in cui compaiono congiuntamente i termini building e information in chiave modellistica, contribuendo alla lessico-genesi che culminerà nell’acronimo BIM.

La fase matura si apre tra 2000 e 2002: nasce Revit (poi acquisito da Autodesk nel 2002), progettato per la modellazione parametrica architettonica con aggiornamento istantaneo delle viste e gestione di fasi/tempi (4D); nello stesso periodo Jerry Laiserin propone e diffonde l’etichetta unificante “Building Information Modeling”, rapidamente adottata dai maggiori vendor come nome dell’“oltre-CAD”.¹⁶

¹⁶Sintesi storica ricostruita sulla base della letteratura classica con riferimento a:
C. Eastman, *An Outline of the Building Description System*, 1974
R. Aish *Building Modelling: The Key to Integrated Construction CAD*, 1986
J. Laiserin *Comparing Pommes and Naranjas*, 2002
Lumini, *L’HBIM per la fruizione virtuale interattiva*, 2021

5.3 Le 10 dimensioni del BIM

Con il termine dimensioni del BIM si intende l'insieme progressivo degli aspetti e delle informazioni che la metodologia BIM è in grado di gestire all'interno di un processo progettuale, costruttivo e gestionale.

A partire dalle prime due dimensioni, la 2D e la 3D, che corrispondono alla rappresentazione bidimensionale e tridimensionale già diffuse anche al di fuori dei software BIM, si aggiungono ulteriori livelli informativi che ampliano le potenzialità del modello, fino a comprendere la gestione dei tempi, dei costi, della manutenzione e della sostenibilità dell'opera.

La quarta dimensione (4D) riguarda la gestione temporale del progetto. Essa introduce il fattore tempo come variabile integrata nel modello informativo, permettendo di pianificare, monitorare e simulare l'evoluzione del cantiere nel corso delle diverse fasi operative.

Attraverso la quarta dimensione, i dati estratti dal modello BIM possono essere associati a cronoprogrammi consentendo la verifica visiva dello stato di avanzamento dei lavori e la valutazione delle eventuali criticità. Software dedicati, come Navisworks, permettono di visualizzare tridimensionalmente l'evoluzione temporale del progetto, generando simulazioni che riproducono il reale progresso delle attività di cantiere.

L'integrazione della quarta dimensione risponde alla crescente complessità dei processi costruttivi contemporanei, in cui il coordinamento tra le figure coinvolte (progettisti, imprese, fornitori e direzione lavori) richiede un controllo continuo e dinamico.

In questo modo, il modello informativo diventa uno strumento strategico per la programmazione delle lavorazioni, la previsione delle durate, la verifica del rispetto delle tempistiche e l'ottimizzazione delle risorse.

Inoltre, associando parametri di avanzamento agli elementi del modello, a livello di categorie, gruppi o singole istanze, è possibile monitorare la percentuale di completamento delle attività in tempo reale. L'aggiornamento dei dati direttamente in cantiere, tramite database sincronizzati in cloud, riduce i tempi di back-office e il rischio di errori, garan-

tendo un flusso informativo continuo e bidirezionale tra progetto e realtà operativa.

La quinta dimensione (5D) introduce il parametro economico, consentendo di associare ai modelli digitali le informazioni relative ai costi di materiali, forniture e manodopera.

Grazie a questa integrazione, è possibile automatizzare le procedure di computo metrico e di stima, aggiornando in modo immediato il quadro economico complessivo a seguito di modifiche progettuali. In una logica 5D, il modello BIM si trasforma in un sistema di controllo integrato tra quantità, tempi e costi, capace di supportare le decisioni strategiche e di garantire maggiore trasparenza nella gestione finanziaria del progetto.

La sesta dimensione (6D) è dedicata alla gestione e manutenzione dell'edificio costruito, e rappresenta una delle evoluzioni più significative in ambito di facility management.

Attraverso il modello BIM è infatti possibile monitorare nel tempo lo stato di conservazione dell'edificio, pianificare interventi di manutenzione ordinaria e straordinaria e gestire in modo univoco le informazioni relative a impianti, finiture e materiali.

Questa dimensione trova particolare applicazione nel caso di edifici esistenti, dove, a partire da una campagna di rilievo integrato e dalla successiva modellazione informativa, è possibile ottenere un as-built model aggiornato e costantemente implementabile.

L'integrazione di database relazionali (come ODBC o piattaforme cloud sincronizzate) consente inoltre di raccogliere e aggiornare le informazioni direttamente in situ, durante i sopralluoghi, eliminando la necessità di annotazioni manuali e riducendo la possibilità di errori o dimenticanze. In tale contesto, la 6D concretizza la vera essenza del BIM come digital twin dell'edificio, in cui le informazioni geometriche e alfanumeriche diventano un patrimonio dinamico per la gestione del bene nel tempo.

La settima dimensione (7D) amplia ulteriormente le potenzialità della metodologia, introducendo i parametri di sostenibilità ambientale. In questo ambito, il BIM supporta l'analisi dei consumi energetici, la valutazione del ciclo di vita dei materiali (LCA) e la stima delle emissioni di CO₂, permettendo una progettazione più consapevole e orientata alla riduzione dell'impatto ambientale.

Attraverso l'interoperabilità con software di analisi energetica e ambientale, il modello diventa così un supporto concreto per la certificazione e la gestione sostenibile dell'o-

pera.

Le dimensioni successive, ancora in fase di sperimentazione e definizione operativa, mirano a estendere ulteriormente il potenziale del BIM.

L'ottava dimensione (8D) si riferisce alla sicurezza nei cantieri e nella gestione dell'opera, integrando nel modello procedure, rischi e protocolli di prevenzione.

La nona dimensione (9D) riguarda invece l'ottimizzazione del processo costruttivo nel suo complesso, includendo aspetti logistici, di trasporto materiali, gestione rifiuti e standardizzazione dei processi produttivi.

Infine, la decima dimensione (10D), definita come Industrializzazione delle costruzioni, si propone di migliorare il sistema edilizio attraverso l'uso di tecnologie digitali, automazione e processi prefabbricati, in un'ottica di efficienza e sostenibilità complessiva.

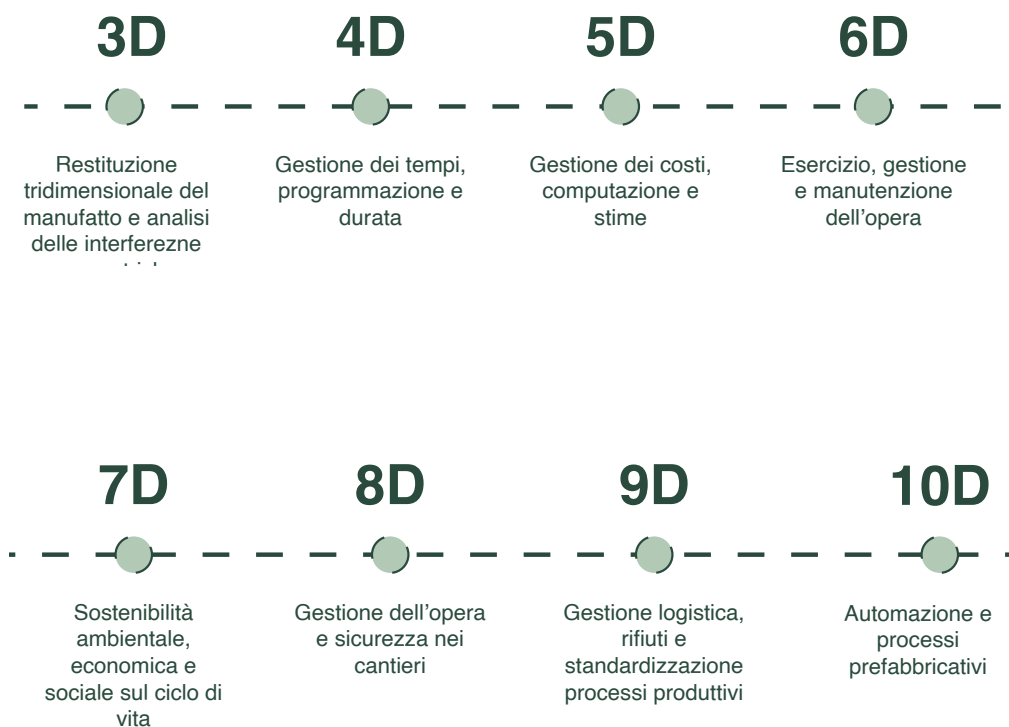


Figura 85: le 10 dimensioni del BIM (fonte: elaborazione personale)

5.4 Modellazione parametrica

La modellazione parametrica rappresenta un'evoluzione significativa rispetto alla modellazione geometrica tradizionale, poiché introduce una logica di costruzione del modello basata su relazioni e dipendenze tra gli oggetti. In un modello parametrico, infatti, i componenti tridimensionali sono collegati tra loro da parametri che ne controllano dimensioni, posizioni e proprietà; modificando un singolo valore, tutte le parti a esso collegate si aggiornano automaticamente, mantenendo la coerenza del sistema complessivo. Si tratta quindi di un approccio relazionale, in cui gli oggetti non esistono più come elementi isolati, ma come componenti interconnessi di una struttura dinamica.

Questa logica si differenzia profondamente dalla modellazione solida tradizionale, dove ogni elemento è un'entità autonoma, priva di legami con gli altri. In un sistema geometrico convenzionale, per apportare una variazione è necessario intervenire manualmente su tutte le istanze interessate e su tutti gli elaborati che le rappresentano. Nella modellazione parametrica, invece, la stessa operazione genera un aggiornamento automatico di ogni parte collegata, con una propagazione immediata delle modifiche a piante, sezioni, viste tridimensionali e abachi. In questo modo si ottiene un modello coerente, che riduce il rischio di errore e permette un controllo più efficiente e accurato dell'intero processo progettuale.

In ambiente BIM, il concetto di parametro assume un significato più ampio e articolato. Esso non è soltanto un nodo di un sistema di regole matematiche, come nella modellazione algoritmica, ma diventa un attributo informativo o geometrico che definisce le caratteristiche di ogni oggetto. Il parametro può quindi rappresentare un dato dimensionale, un materiale, una prestazione energetica, un costo, o qualunque altra proprietà utile a descrivere e gestire l'oggetto nel modello. Ogni elemento del modello è definito da una serie di parametri che ne determinano il comportamento e le relazioni con gli altri componenti. La modifica di un singolo parametro, come ad esempio la stratigrafia di una parete o la classe prestazionale di un serramento, non solo aggiorna automaticamente tutte le istanze di quell'oggetto, ma comporta anche la revisione dei calcoli associati,

superfici, volumi, costi, prestazioni termiche o acustiche, assicurando un allineamento costante tra il dato geometrico e quello informativo.

I parametri possono essere distinti in parametri di tipo e parametri di istanza: i primi influenzano tutte le occorrenze di un determinato oggetto nel modello, mentre i secondi riguardano esclusivamente l'elemento specifico su cui si interviene. Questa distinzione consente una gestione flessibile e precisa delle informazioni, permettendo al progettista di controllare sia il comportamento generale degli elementi, sia le loro eccezioni puntuali. In un modello BIM, ogni informazione, geometrica o alfanumerica, può essere considerata un parametro, e la loro combinazione costituisce la base di un sistema informativo complesso, interrogabile in qualsiasi momento. Piante, sezioni, prospetti, abachi e viste tridimensionali non sono altro che modalità diverse di consultazione di questo stesso database, dove ogni rappresentazione è la conseguenza diretta delle relazioni stabilite all'interno del modello.

Il modello BIM, in questo senso, si comporta come un vero e proprio database tridimensionale, in cui le geometrie sono inscindibilmente legate a dati e attributi. Le informazioni contenute possono essere estratte, analizzate, aggiornate e rielaborate anche esternamente, generando ad esempio database ODBC (Open Database Connectivity) utili per la gestione dell'edificio nelle fasi di costruzione o manutenzione.

Un ulteriore vantaggio della modellazione parametrica è la possibilità di gestire le fasi temporali di un progetto all'interno dello stesso modello. Ogni oggetto può essere associato a una fase specifica (esistente, demolizione, costruzione, manutenzione, alternativa progettuale), consentendo di rappresentare scenari differenti senza duplicare il modello. Questo permette di confrontare in modo diretto lo stato di fatto e quello di progetto, di visualizzare varianti e di pianificare la sequenza delle lavorazioni, fino a gestire i tempi di costruzione in ottica 4D. Anche in questo caso, la forza della modellazione parametrica risiede nella capacità di concentrare le informazioni in un unico ambiente coerente, evitando la dispersione di dati e garantendo la tracciabilità delle modifiche nel tempo.

5.5 L'approccio sinergico

L'introduzione della metodologia BIM ha trasformato profondamente il modo di concepire, sviluppare e gestire la progettazione architettonica.

Nel processo tradizionale, le diverse figure professionali intervenivano in modo sequenziale e separato: ogni fase dipendeva dalla precedente, in un flusso di lavoro lineare che spesso generava ridondanze, tempi lunghi e perdita di coerenza tra gli elaborati.

Il BIM ha invece introdotto un approccio sinergico e collaborativo, nel quale tutti i soggetti coinvolti, architetti, strutturisti, impiantisti, tecnici della sicurezza, gestori, possono lavorare simultaneamente e in modo coordinato sullo stesso progetto digitale.

Questa metodologia consente di ridurre notevolmente i tempi di sviluppo, migliorare la qualità del risultato finale e ottimizzare la comunicazione tra le varie discipline.

Grazie alla possibilità di operare su modelli tematici collegati a un modello centrale o federato, accessibile in base a permessi controllati, l'intero flusso informativo rimane costantemente aggiornato e tracciabile. Generalmente, i modelli architettonici e impiantistici assumono un ruolo prioritario, mentre le altre discipline si collegano in riferimento a questi, verificando interferenze e sincronizzando le proprie modifiche.

L'obiettivo, ancora non completamente diffuso ma sempre più perseguito, è quello di lavorare in un ambiente digitale condiviso in cui le modifiche di ciascun professionista vengano recepite e integrate in tempo reale, consentendo un confronto continuo e la verifica immediata della compatibilità tra i diversi contributi progettuali.

L'approccio sinergico consente quindi di superare la frammentazione tipica dei processi convenzionali, dove la condivisione di file eterogenei comportava conversioni multiple, rischio di errori e rallentamenti operativi.

Il BIM centralizza e struttura tutte le informazioni in un unico modello informativo: un vero e proprio database digitale dell'edificio, dal quale è possibile estrarre, aggiornare e verificare qualunque elaborato o dato in qualsiasi momento, mantenendo la coerenza complessiva del progetto e riducendo la possibilità di incongruenze.

5.5.1 Interoperabilità e gestione dei flussi informativi

Alla base di questa nuova organizzazione si trova il concetto di interoperabilità, ovvero la capacità dei diversi software di comunicare e scambiarsi dati in maniera strutturata, affidabile e senza perdita di informazioni.

L'interoperabilità rappresenta uno dei pilastri della metodologia BIM perché consente di sostituire la frammentazione tipica dei processi tradizionali con uno scambio automatico e controllato di dati, garantendo la continuità informativa lungo tutte le fasi di vita dell'opera: dalla progettazione alla costruzione, fino alla gestione e manutenzione.

Si distinguono due forme di interoperabilità.



Figura 86: gestione dei flussi informativi nel processo tradizionale (fonte: rielaborazione personale)



Figura 87: gestione dei flussi informativi nel processo tradizionale (fonte: rielaborazione personale)

La prima, orizzontale, riguarda lo scambio di dati tra software che gestiscono lo stesso tipo di informazioni ma appartengono a produttori diversi (ad esempio Revit e Archicad).

La seconda, verticale, si riferisce invece allo scambio di dati tra software complementari, utilizzati per analisi specifiche come verifiche energetiche, calcoli strutturali, simulazioni acustiche, analisi ambientali o studi sul ciclo di vita dei materiali.

In entrambi i casi, è indispensabile utilizzare formati aperti e standardizzati, capaci di veicolare non solo la componente geometrica, ma anche quella informativa, garantendo la leggibilità dei dati da parte di piattaforme differenti.

L'interoperabilità può essere bidirezionale o unidirezionale, a seconda che lo scambio di informazioni permetta o meno di rientrare nel software nativo per aggiornare o correggere i dati.

Un flusso realmente interoperabile deve assicurare la biunivocità dello scambio, in modo che il dato non si limiti a essere esportato, ma possa anche essere aggiornato e reinserito nel modello originale. Questo aspetto è fondamentale per mantenere la coerenza e l'affidabilità delle informazioni in tutte le fasi del processo edilizio.

L'interoperabilità, in sostanza, consente di costruire un linguaggio comune tra i vari professionisti, riducendo i tempi di lavoro e minimizzando il rischio di errori dovuti all'inserimento manuale dei dati o alla perdita di informazioni tra software diversi.

5.5.2 Standard IFC

All'interno del processo BIM, lo standard IFC (Industry Foundation Classes) rappresenta il principale strumento di interoperabilità.

Si tratta di un formato aperto e non proprietario sviluppato per codificare le informazioni di un modello BIM in modo da renderle leggibili, trasferibili e consultabili da qualunque software compatibile.

L'IFC costituisce quindi una sorta di lingua franca nel dialogo tra piattaforme e figure professionali diverse, capace di garantire la conservazione e l'integrità delle informazioni contenute nei modelli.

Questo formato consente di trasmettere non solo le geometrie degli oggetti, ma an-

che le loro proprietà, relazioni, classificazioni, materiali, parametri tecnici e funzionali, rendendolo uno strumento completo e affidabile per la consultazione e il coordinamento tra discipline.

Proprio per questo, l'IFC viene spesso paragonato al PDF: così come un documento in PDF può essere letto e commentato ma non modificato, anche il modello IFC viene utilizzato principalmente per la consultazione, la verifica e il coordinamento piuttosto che per la modellazione diretta.

La sua funzione non è quindi quella di sostituire i file nativi dei software, ma di fornire un formato stabile, neutrale e condivisibile che consenta a tutti gli attori del processo di accedere alle stesse informazioni.

I vantaggi derivanti dall'uso dello standard IFC sono molteplici:

- garantisce un linguaggio comune tra le varie discipline;
- riduce la perdita di dati nei passaggi tra software differenti;
- permette la tracciabilità delle informazioni durante tutto il ciclo di vita dell'opera;
- facilita il coordinamento tra i professionisti, migliorando la qualità complessiva del progetto.

A completamento dello standard, sono stati introdotti strumenti complementari come l'IDS (Information Delivery Specification) e l'IDM (Information Delivery Manual).

L'IDS definisce e valida il livello di dettaglio richiesto nella modellazione e controlla la coerenza delle informazioni inserite, mentre l'IDM stabilisce le modalità, i tempi e i destinatari della condivisione dei dati, fungendo da manuale operativo per la gestione del flusso informativo.

Insieme, questi strumenti costituiscono la base per un sistema informativo coerente, trasparente e controllato, capace di mantenere la qualità dei dati in ogni fase del progetto.

Il cuore operativo dell'interoperabilità si concretizza poi nell'Ambiente di Condivisione Dati (ACdat), uno spazio digitale condiviso dove vengono raccolti tutti i modelli e gli elaborati informativi prodotti dalle diverse discipline.

L'ACdat garantisce la tracciabilità delle modifiche, la sincronizzazione dei dati e la possibilità di accedere in tempo reale alle informazioni aggiornate, diventando così un vero

centro decisionale per la progettazione e la gestione.

Attraverso questo ambiente è possibile controllare e risolvere le interferenze tra modelli, tramite le funzioni di clash detection, e definire ruoli, autorizzazioni e livelli di accesso che assicurano la coerenza generale del progetto.

La possibilità di operare con database sincronizzati in cloud, aggiornabili anche in cantiere, chiude il cerchio di un processo integrato che collega progettazione, costruzione e gestione.

Ogni modifica si propaga automaticamente a tutte le viste e agli elaborati derivati, assicurando coerenza, efficienza e tracciabilità del progetto nel tempo.

In questo modo, l'interoperabilità e lo standard IFC si configurano come i veri pilastri del metodo BIM, rendendo possibile un flusso di lavoro realmente condiviso, trasparente e integrato, capace di connettere tutte le fasi e tutti gli attori del ciclo di vita dell'edificio.

5.6 Modellazione BIM

All'interno dell'ambiente Revit, la gestione del progetto si fonda sulla definizione di standard condivisi che garantiscono coerenza grafica e informativa lungo tutto il processo di modellazione. Questi standard possono essere salvati all'interno di un file di modello denominato template (.rte), che costituisce la base per la creazione di nuovi progetti. All'interno del template è possibile definire impostazioni grafiche, spessori di linea, stili di rappresentazione, materiali, modelli di vista, parametri di quota e testo, nonché regole di visualizzazione, filtri e nomenclature delle tavole. La creazione di un template personalizzato permette di stabilire un linguaggio comune e un coordinamento efficace tra i professionisti coinvolti, facilitando la collaborazione interdisciplinare e garantendo uniformità agli elaborati prodotti. Qualora non sia stato predisposto un template specifico, Revit consente comunque di trasferire gli standard da un progetto a un altro, in modo da mantenere omogenee le impostazioni grafiche e informative.

Un aspetto rilevante nella personalizzazione dei modelli riguarda l'utilizzo dei parametri condivisi, che rappresentano un sistema di definizioni contenute in un file di testo esterno. Questi parametri possono essere richiamati in più progetti e famiglie, assicurando coerenza semantica tra le informazioni e rendendo possibile la lettura dei medesimi campi sia all'interno degli abachi sia nelle etichette applicate al modello. In questo modo, il progetto si configura come un sistema informativo aperto, capace di adattarsi alle esigenze di classificazione e gestione dei dati previste dal flusso di lavoro BIM.

Gli elementi che compongono il modello sono organizzati secondo una gerarchia ad albero che parte dalle categorie, prosegue con le famiglie e i tipi, fino ad arrivare alle singole istanze. La categoria rappresenta la classe generale dell'oggetto edilizio, come ad esempio muri, porte o finestre, e determina le regole grafiche e di visibilità ad esso associate. All'interno di ogni categoria, le famiglie definiscono le caratteristiche parametriche dell'oggetto, mentre i tipi rappresentano varianti della stessa famiglia con specifici valori dimensionali o materici. L'inserimento di un tipo nel modello genera un'istanza, cioè un oggetto con proprietà proprie, modificabili individualmente. Esiste inoltre una distinzione

tra oggetti host e oggetti ospitati, poiché alcuni componenti, come le finestre o le porte, necessitano dell'esistenza di un elemento principale, come un muro, per poter essere inseriti correttamente nel modello.

Revit si basa sul principio secondo cui il modello tridimensionale si comporta come un vero e proprio database informativo. Di conseguenza, ogni rappresentazione grafica, che si tratti di piante, sezioni, prospetti o viste tridimensionali, non è altro che una diversa interrogazione dello stesso insieme di dati. La varietà delle visualizzazioni deriva quindi dall'applicazione di filtri, regole di visualizzazione o parametri di fase che consentono di evidenziare aspetti specifici del progetto. È possibile ad esempio filtrare gli elementi per disciplina, visualizzare lo stato di fatto e quello di progetto tramite le fasi di demolizione e costruzione, oppure creare viste tematiche che mettano in evidenza determinate caratteristiche, come materiali o categorie costruttive, mediante regole grafiche impostate dall'utente. Le viste di Revit sono dinamiche e interattive: spostando una linea di sezione o modificando la profondità di visualizzazione, l'immagine si aggiorna automaticamente in tempo reale, mantenendo la coerenza con il modello di riferimento.

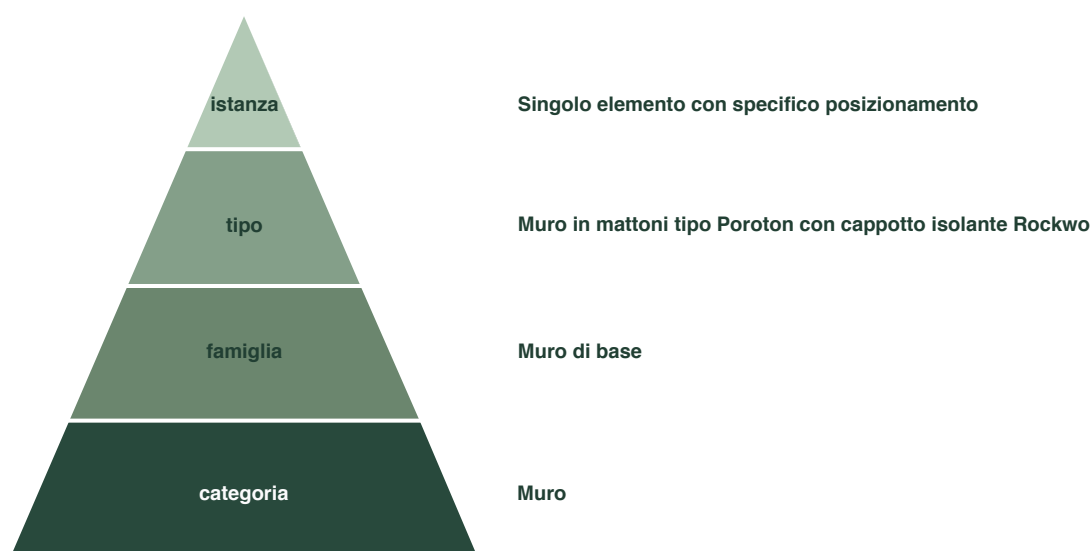


Figura 88: gerarchia ad albero elementi in Revit (fonte: rielaborazione personale)

La componente alfanumerica del modello, definita attraverso parametri di tipo o di istanza, può essere gestita e controllata tramite gli abachi. Questi strumenti consentono

di estrarre, ordinare e modificare i dati relativi agli oggetti, permettendo così di ottenere elenchi e tabelle che rappresentano un'estensione analitica del modello. Gli abachi sono utilizzati per la computazione dei materiali, la stima dei costi, la verifica delle quantità e l'etichettatura automatica degli elementi, garantendo un collegamento costante tra rappresentazione grafica e informazione numerica. L'aggiornamento simultaneo tra modello, abachi ed etichette elimina la necessità di controlli ridondanti e riduce sensibilmente il rischio di errori o incoerenze.

Un'altra distinzione fondamentale in Revit riguarda la tipologia di famiglie, che possono essere di sistema o caricabili. Le famiglie di sistema comprendono gli elementi principali dell'edificio, come muri, solai, pavimenti e tetti. Esse sono parte integrante del progetto e non esistono come file indipendenti; possono essere duplicate e modificate per creare nuovi tipi, definendo ad esempio stratigrafie, materiali o funzioni strutturali. Le famiglie caricabili, invece, sono contenute in file separati con estensione .rfa e comprendono componenti più specifici, come porte, finestre, arredi o attrezzature tecniche. Queste famiglie offrono un maggiore margine di personalizzazione e possono essere create o modificate all'interno dell'editor dedicato, dove è possibile impostare parametri geometrici e informativi, controllare la visibilità in base al livello di dettaglio e regolare l'aspetto grafico in funzione della scala di rappresentazione.

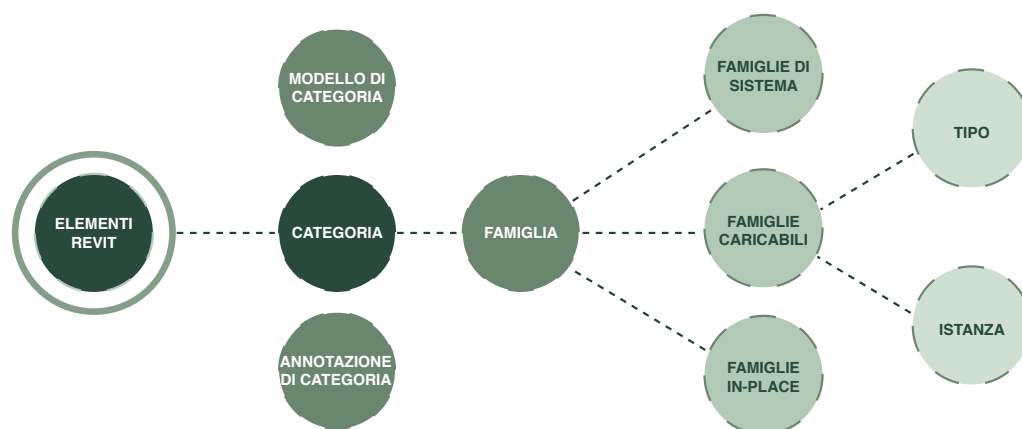


Figura 89: distinzioni elementi in Revit (fonte: rielaborazione personale)

5.7 CAD e BIM a confronto

La prima differenza sostanziale tra CAD e BIM riguarda che cosa si modella e come lo si gestisce.

I sistemi CAD descrivono l'opera tramite geometrie (2D o 3D) prive, di per sé, di informazioni strutturate aggiuntive: piante, sezioni e prospetti sono disegni che l'operatore deve coordinare manualmente.

La metodologia BIM, invece, si fonda su una modellazione a oggetti: ogni elemento (muro, solaio, porta, finestra, impianto, ecc.) ha una geometria e una componente informativa (proprietà, materiali, prestazioni, codifiche). Il modello si comporta come un database: se cambio un parametro di tipo (es. stratigrafia o spessore del "Muro X"), la modifica si propaga a tutte le istanze di quel tipo in tutte le viste e negli abachi.

Da qui discende il principio cardine del BIM: piante, sezioni, 3D e quantificazioni non sono elaborati separati, ma diverse interrogazioni della stessa base dati.

Gli oggetti BIM sono parametrici ed editabili nei limiti previsti dalla famiglia. Le pareti, ad esempio, offrono margini di editing ampi; porte e finestre dipendono dai parametri esposti dalla famiglia. La componente informativa si gestisce anche tramite abachi, modificabili dentro il software BIM o all'esterno e poi reimportati per aggiornare il modello.

Oltre alla rappresentazione, il BIM abilita controlli in tempo reale: durante la modellazione il software può segnalare conflitti (es. pianerottolo che non arriva a quota, porta senza spazio d'inserimento). Inoltre, la gestione per fasi consente di modellare demolizioni/costruzioni e scenari manutentivi lungo il ciclo di vita dell'edificio.

5.7.1 La curva di McLeamy

Il vantaggio del BIM non è solo "nel modello", ma nel processo. L'approccio CAD tradizionale è lineare: le figure professionali si avvicendano in sequenza e le modifiche, se tardive, diventano onerose perché richiedono rielaborazioni diffuse.

L'approccio BIM promuove una collaborazione simultanea: i contributi disciplinari si coordinano in un ambiente condiviso, con clash detection e aggiornamenti coerenti tra

viste e dati. Questo riduce errori e tempi di integrazione, a fronte di un maggiore sforzo iniziale.

La curva di McLeamy visualizza bene questo scambio:

- sull'asse verticale lo sforzo richiesto; sull'asse orizzontale il tempo;
- nel processo tradizionale lo sforzo cresce più tardi (quando le varianti costano molto e la capacità di incidere su costi/prestazioni è bassa);
- nel BIM lo sforzo è anticipato tra fattibilità/progettazione definitiva (quando le varianti costano meno e il margine decisionale è massimo), poi decresce in esecutivo/cantiere.

In pratica: accettando un investimento iniziale più alto (coordinamento, modellazione informativa, regole di visualizzazione, codifiche), si ottiene un processo più stabile, con meno sorprese in fasi avanzate e minori costi di variante.

Il BIM, misurato nelle sue “dimensioni”, estende il controllo dal progetto alla costruzione e fino alla gestione del bene.

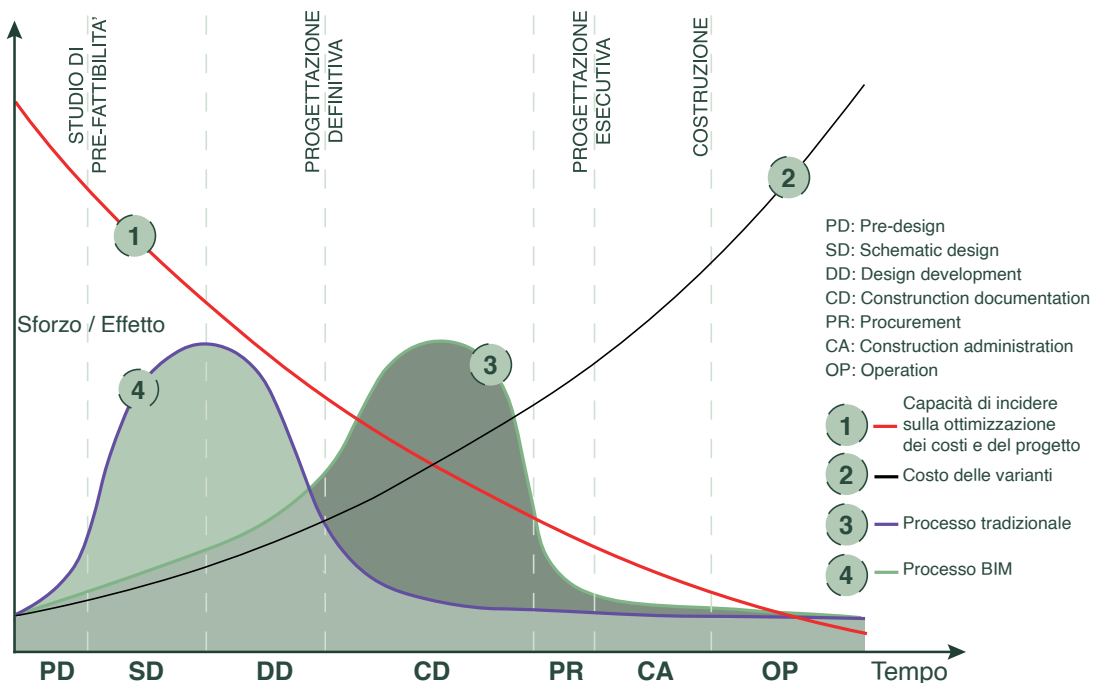


Figura 90: la curva di McLeamy (fonte: rielaborazione personale)

In CAD, il progettista disegna per la scala: ogni tavola richiede un livello di dettaglio coerente, spesso ridisegnando o aggiornando manualmente parti già prodotte.

In BIM, la scala e il livello di dettaglio si controllano tramite stili di oggetto, sostituzioni grafiche e impostazioni LOD: la stessa entità può essere rappresentata in modo più o meno dettagliato a seconda della vista.

Da qui il senso operativo della frase: “non dovremmo mai disegnare la stessa cosa due volte”.

Nel CAD ogni variante implica aggiornare più elaborati, con rischio di disallineamenti (una stratigrafia corretta in pianta, ma non in sezione, ecc.).

Nel BIM, la modifica una tantum del dato propaga automaticamente a piante, sezioni, 3D, abachi, legende e perfino annotazioni governate da parametri.

Il risultato è un forte risparmio di tempo, minori errori e una coerenza globale del progetto. A modellazione completata, dal medesimo modello si estraggono tutti gli elaborati necessari, impostando regole (modelli di vista, filtri, fasi, sostituzioni grafiche) per ottenere rappresentazioni adeguate al contesto e alla scala.

5.8 Normativa

La norma UNI 11337 rappresenta il principale riferimento normativo nazionale per la definizione e la gestione dei processi informativi in ambito edilizio e infrastrutturale. È una norma articolata in dodici parti, pensate per fornire linee guida e criteri tecnici sull'adozione della metodologia BIM nelle varie fasi del ciclo di vita dell'opera.

Le prime sezioni introducono il concetto di BIM e le procedure generali per la sua adozione; seguono la classificazione delle opere e delle attività, la definizione dei metodi di raccolta, archiviazione e gestione dei dati derivanti dai modelli informativi e la distinzione tra le due componenti principali: LOG (Level of Geometry) e LOI (Level of Information).

Viene inoltre introdotto il concetto di LOIN (Level of Information Needed), che definisce il livello di informazione effettivamente necessario in funzione dello scopo, della fase o della tipologia di progetto. Le sezioni successive trattano poi la corretta produzione e lo scambio di informazioni tramite formati aperti, la redazione dei capitolati informativi, la definizione di ruoli e competenze dei professionisti coinvolti, le procedure di transizione dai processi tradizionali al BIM e la gestione complessiva dell'opera, fino alle verifiche amministrative, alla sicurezza e alle prassi di riferimento operative.

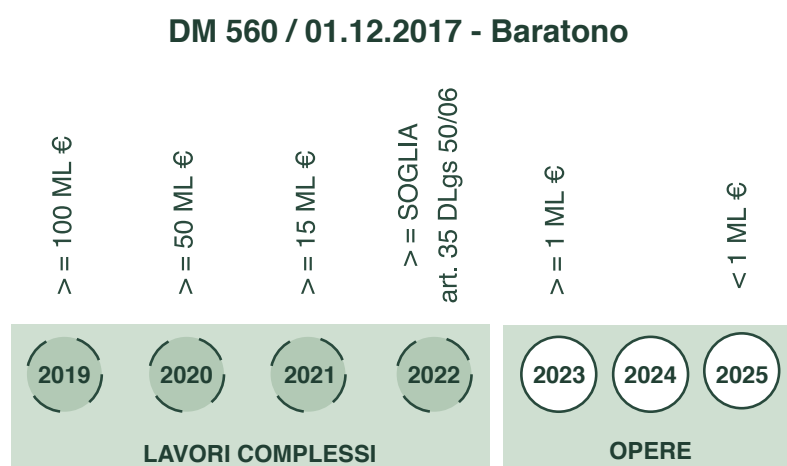


Figura 91: schematizzazione Decreto Ministeriale 560/2017 Baratono (fonte: rielaborazione personale)

A livello legislativo, la normativa italiana si integra con il Decreto Ministeriale 560/2017, noto come Decreto Baratonò, che ha introdotto l'obbligatorietà progressiva dell'utilizzo del BIM negli appalti pubblici, fissando soglie economiche decrescenti oltre le quali l'uso del metodo diventa obbligatorio. La soglia iniziale di 100 milioni di euro è stata progressivamente ridotta negli anni successivi, fino a raggiungere importi molto più bassi e in linea con le soglie comunitarie.

Il decreto, che attua l'articolo 23, comma 13, del Codice dei Contratti Pubblici, richiede inoltre l'impiego di formati aperti e interoperabili, in particolare il formato IFC, per garantire la trasparenza e la tracciabilità dei dati lungo tutte le fasi di progettazione, costruzione e gestione.

In questo quadro, la UNI 11337 e il DM 560/2017 costituiscono un insieme coerente di riferimenti che, insieme alle linee guida ministeriali e alle prassi di riferimento, mirano alla standardizzazione e qualificazione dei processi BIM nel contesto italiano.

5.7.1 Livelli di dettaglio: LOD, LOG, LOI, LOIN

Uno degli aspetti fondamentali regolati dalla normativa riguarda la definizione dei livelli di dettaglio (Level of Development o Level of Detail), comunemente abbreviati in LoD.

Per evitare ambiguità terminologiche, la norma italiana distingue le due principali componenti del modello informativo:

- LOG (Level of Geometry), relativo al livello di definizione geometrica;
- LOI (Level of Information), relativo alla quantità e qualità delle informazioni alfanumeriche associate.

A queste si aggiunge il concetto di LOIN (Level of Information Needed), che sottolinea la necessità di calibrare il livello informativo “sufficiente” e pertinente per ciascuna fase del progetto o obiettivo operativo, evitando modelli eccessivamente semplificati o, al contrario, sovraccarichi di dati.

È importante ricordare che LOG e LOI non crescono necessariamente di pari passo: una geometria semplice può contenere un'elevata quantità di dati informativi, mentre un modello graficamente dettagliato può essere povero di attributi. La coerenza tra le due

componenti dipende dallo scopo per cui il modello viene utilizzato.

NORMA UNI 11337_2017

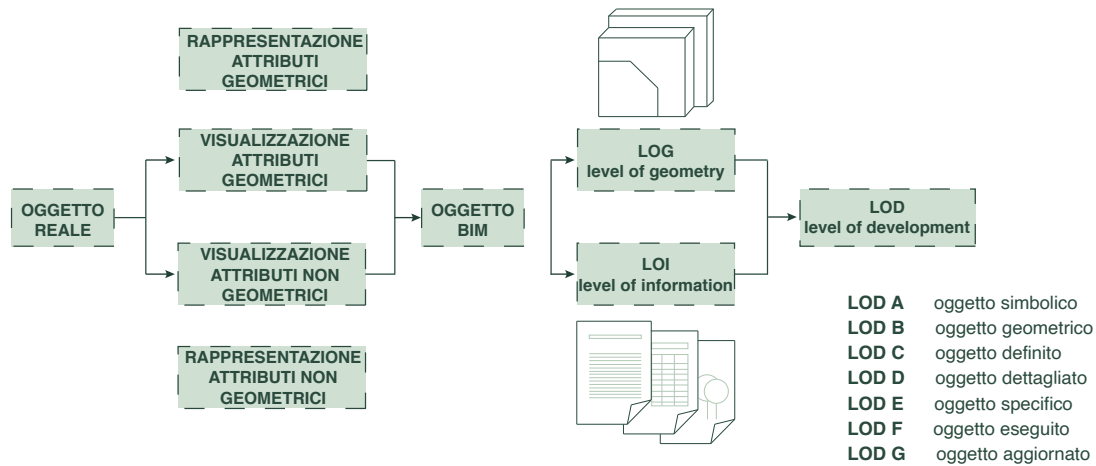


Figura 92: schematizzazione Norma UNI 11337/2017 (fonte: rielaborazione personale)

I livelli LoD sono organizzati in una scala progressiva che varia leggermente tra i diversi contesti normativi (USA, Italia, Regno Unito), ma segue sempre una logica comune di incremento del dettaglio geometrico e informativo:

- **LoD 100** – Rappresenta il livello preliminare e schematico. Gli oggetti sono indicativi e descritti in modo simbolico, senza dati associati oltre la semplice categoria. Può trattarsi anche di componenti puramente grafiche, utili a valutazioni di massima (es. volumetrie, stime energetiche o economiche).
- **LoD 200** – È il livello di concept: le geometrie iniziano a essere definite in termini di ingombri e proporzioni, con l'aggiunta di prime informazioni alfanumeriche (materiali generici, destinazioni d'uso, prestazioni indicative). La rappresentazione resta approssimativa, ma consente già un primo controllo spaziale e funzionale.
- **LoD 300** – Segna la progettazione definita. Gli oggetti hanno dimensioni esatte, le geometrie sono coerenti con la realtà costruttiva e i parametri informativi si arricchiscono di descrizioni più precise, come caratteristiche tecniche, materiali o produttori. È il livello normalmente associato alla progettazione esecutiva.
- **LoD 400** – Riguarda il livello costruttivo e di fabbricazione, in cui il modello è pronto per la produzione dei dettagli costruttivi, dei computi metrici e per la pianifica-

zione del cantiere. Le informazioni includono dati completi su materiali, elementi prefabbricati, fornitori e modalità di assemblaggio.

- **LoD 500** – È il livello degli as built, in cui il modello rappresenta fedelmente lo stato finale dell'opera realizzata, comprensivo di tutti i dati di installazione, fornitura, collaudo e manutenzione.

La progressione dei livelli di dettaglio implica anche criteri redazionali e di rappresentazione che devono essere gestiti con attenzione dal progettista.

A un LoD 100 corrisponde una rappresentazione grafica semplificata e simbolica, anche bidimensionale; al LoD 200 le geometrie restano approssimative ma accompagnate da informazioni utili alla definizione dell'ingombro e delle prestazioni; al LoD 300 la rappresentazione si affina, includendo stratigrafie e materiali; al LoD 400 è possibile produrre i dettagli costruttivi, controllando attentamente le impostazioni di vista, gli stili di oggetto e le famiglie 2D che completano la rappresentazione tridimensionale.

Infine, il LoD 500 prevede una rappresentazione del tutto fedele alla realtà, idonea alla gestione e alla manutenzione dell'edificio, e aggiornata con le informazioni di fornitura e datazione degli interventi.

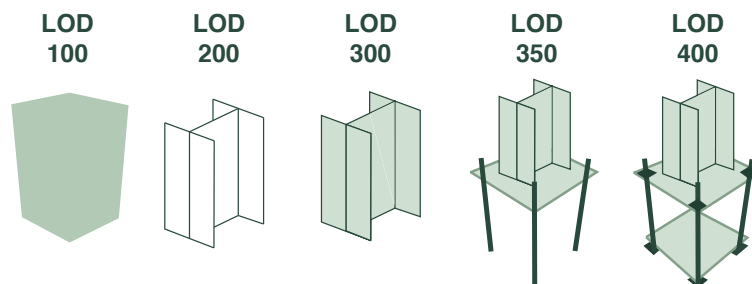


Figura 93: schematizzazione progressivi livelli di dettaglio LOD (fonte: rielaborazione personale)

In ambito britannico, il protocollo AEC definisce livelli analoghi denominati grade (G0–G3), dove il G0 corrisponde a una rappresentazione schematica, il G1 a un concept definito negli ingombri, il G2 a un buon livello geometrico e informativo e il G3 a una resa grafica più realistica (rendered).

Analogamente, la Minimum Modeling Matrix (M3) elaborata dall'USACE (United States Army Corps of Engineers) distingue tre livelli principali (C, B e A), che integrano progres-

sivamente rappresentazione 2D, dati informativi e modellazione 3D.

Secondo la prassi corrente, un modello BIM idoneo alla produzione dei disegni costruttivi si colloca tra LoD 350 e LoD 400, dove la componente informativa e quella geometrica risultano sufficientemente sviluppate per la costruzione. Il LoD 500, invece, è riservato alla documentazione finale e alla consegna dell'opera.

In tutte le fasi, è fondamentale che il progettista controlli le proprietà degli oggetti e la coerenza dei parametri per garantire la leggibilità del modello e la correttezza dei dati: ciò richiede un uso consapevole dei filtri di vista, delle sostituzioni grafiche e delle etichette parametriche, strumenti che permettono di restituire informazioni coerenti con il livello di dettaglio previsto.

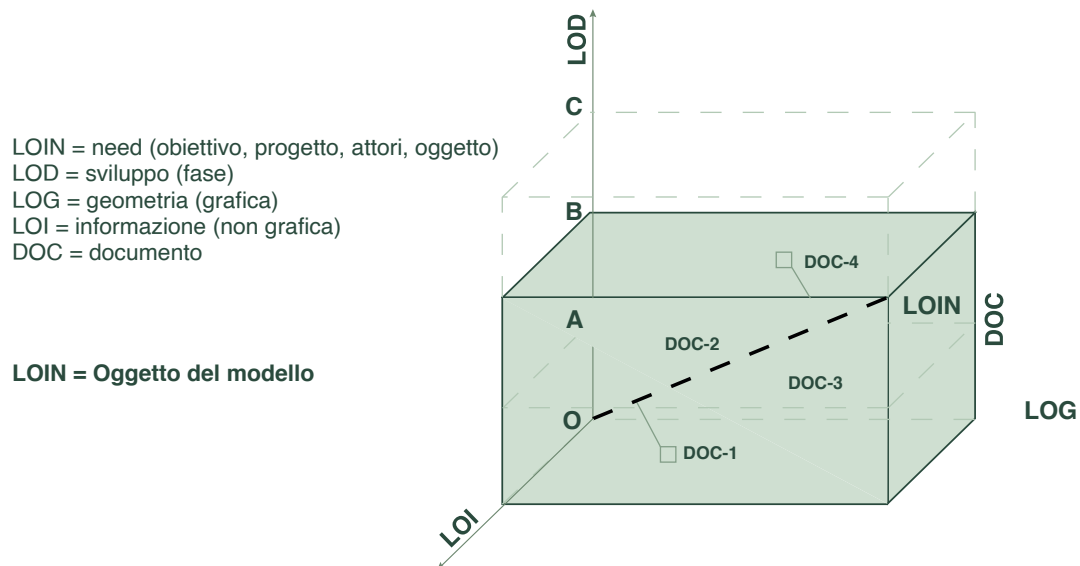


Figura 94: schematizzazione oggetto del modello LOIN (fonte: rielaborazione personale)

5.9 Heritage Building Information Modeling

L'Heritage Building Information Modeling (HBIM) rappresenta una delle evoluzioni più significative della metodologia BIM, nata dall'esigenza di estendere i principi della modellazione informativa e parametrica anche al campo della documentazione, del restauro e della gestione del patrimonio costruito. Sebbene la "H" richiami esplicitamente il concetto di heritage, l'HBIM non è limitato ai soli edifici vincolati o monumentali: esso si applica a tutti i casi in cui l'oggetto di studio è un manufatto esistente, la cui conoscenza geometrica e materica costituisce la premessa indispensabile per qualunque intervento di conservazione, recupero o valorizzazione.

Il termine HBIM fu introdotto nel 2007 dal gruppo di ricerca irlandese guidato da Maurice Murphy, in collaborazione con Eugene McGovern e Sara Pavia, presso il Dublin Institute of Technology e il Trinity College di Dublino. In occasione dell'8° International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Intelligent Cultural Heritage, il team presentò un nuovo sistema di modellazione delle architetture storiche basato sull'integrazione tra rilievo digitale, modellazione parametrica e gestione informativa. Due anni più tardi, lo stesso gruppo definì l'HBIM come un metodo capace di combinare i dati provenienti da rilievi laser scanner e fotogrammetria digitale con librerie di oggetti parametrici costruite secondo regole architettoniche storiche, delineando così un approccio replicabile di scan-to-BIM applicato al patrimonio costruito.

Nel 2012, Murphy formalizzò questa metodologia all'interno della sua tesi di dottorato, definendo un flusso di lavoro articolato in cinque fasi: acquisizione dei dati geometrici tramite laser scanner, analisi delle fonti storiche e delle proporzioni architettoniche, creazione di librerie di componenti parametrici, loro applicazione sulle nuvole di punti o ortofotografie, ed estrazione automatica di elaborati grafici e informativi. Sperimentato su edifici georgiani di Dublino, questo processo pose le basi per lo sviluppo di una ricerca internazionale volta alla definizione di procedure standard per la digitalizzazione e la conoscenza del patrimonio architettonico.

Oggi l'HBIM si configura come una piattaforma digitale capace di integrare e gestire un

ampio spettro di dati – metrici, materici, storici e documentali – all'interno di un ambiente interoperabile e coerente. Il modello informativo, oltre a restituire tridimensionalmente le caratteristiche geometriche e costruttive dell'edificio, assume la funzione di archivio dinamico e continuamente implementabile, impiegabile in diverse fasi operative: dalla documentazione al restauro, dalla manutenzione alla diagnostica, fino alla valorizzazione e alla fruizione virtuale. In tal senso, l'HBIM non è soltanto un sistema di rappresentazione, ma un vero e proprio repository informativo del bene, capace di combinare contenuti qualitativi e quantitativi e di supportare l'intero ciclo di vita dell'opera.

La differenza principale tra BIM e HBIM risiede nell'oggetto e nelle modalità di modellazione. Nel BIM applicato al nuovo, il processo si fonda su componenti predefiniti, spesso forniti dai produttori e corredati da parametri tecnici, economici e prestazionali. Nell'HBIM, invece, il punto di partenza è sempre un rilievo accurato dell'esistente, indispensabile per garantire la fedeltà geometrica e materica del modello. L'acquisizione dei dati avviene tramite rilievo laser scanner o fotogrammetria terrestre e aerea, eventualmente integrati con misure GNSS o stazioni totali. La nuvola di punti così ottenuta diventa la base di riferimento per la modellazione informativa, consentendo di rilevare anche le più piccole irregolarità e deformazioni dell'edificio reale.

Su questa base si costruisce il modello HBIM vero e proprio, in cui le componenti architettoniche, strutturali o decorative vengono ricostruite attraverso famiglie parametriche specifiche, spesso nidificate e personalizzate per rappresentare con precisione le caratteristiche uniche del bene. A differenza del BIM per il nuovo, dove gli oggetti sono standardizzati, l'HBIM richiede la creazione di famiglie ad hoc a partire dalle sezioni e dalle proiezioni della nuvola di punti, mediante estrusioni, sottrazioni e forme complesse che riflettono le irregolarità dell'esistente. Questa parametrizzazione non ha solo una funzione geometrica, ma anche operativa: consente di adattare rapidamente oggetti simili, come cornici o modanature, senza rimodellarli di volta in volta, garantendo al contempo accuratezza e flessibilità.

Il vero valore aggiunto dell'HBIM, tuttavia, non risiede solo nella precisione geometrica, ma nella componente informativa che accompagna il modello. Ogni elemento può essere

arricchito da dati relativi ai materiali, alle tecniche costruttive, allo stato di conservazione, alla cronologia degli interventi e alle fonti documentarie. In questo modo, il modello diventa una base conoscitiva integrata, capace di restituire non solo la forma e la struttura dell'edificio, ma anche la sua storia, le sue trasformazioni e il suo stato di salute. Grazie a questa natura di database tridimensionale, l'HBIM può includere schede di degrado, piani di manutenzione, immagini storiche, documenti d'archivio e dati diagnostici provenienti da sensori o monitoraggi in situ, fornendo così uno strumento efficace per la conservazione programmata e la gestione del bene nel tempo.

Le potenzialità dell'HBIM si estendono anche alla simulazione e alla prevenzione dei rischi: mediante l'integrazione con software di analisi e plug-in dedicati, è possibile modellare scenari di eventi catastrofici – come sismi, incendi o allagamenti – e valutare la risposta strutturale dell'edificio, definendo strategie di mitigazione e piani di emergenza. Allo stesso modo, l'HBIM può essere utilizzato per analisi energetiche e studi di efficienza, mantenendo costante il legame tra dati metrici, materiali e prestazioni.

Operativamente, l'HBIM si basa sugli stessi principi del BIM tradizionale: il modello costituisce un sistema informativo unificato, in cui piante, sezioni, viste tridimensionali e abachi non sono documenti separati, ma differenti modalità di interrogazione della medesima base dati. Questo garantisce coerenza e aggiornamento automatico tra tutte le rappresentazioni, riducendo la ridondanza e il rischio di errore. Nei progetti più complessi, la collaborazione tra discipline può essere organizzata tramite modelli tematici collegati a un modello federato centrale, che coordina le modifiche e assicura la compatibilità tra le varie componenti architettoniche, strutturali, impiantistiche e conservative.



Figura 95: schematizzazione processo per modello HBIM (fonte: elaborazione personale)

In ambito accademico, l'HBIM rappresenta oggi un campo di sperimentazione in costante evoluzione. Le ricerche si concentrano sull'automazione dei processi di modellazione a partire dalle nuvole di punti, sulla creazione di librerie parametriche dedicate al patrimonio storico e sulla definizione di standard condivisi per la catalogazione e la gestione dei dati. L'obiettivo è trasformare l'HBIM in una piattaforma di conoscenza aperta, interoperabile e collaborativa, capace di integrare rilievo, analisi, restauro e valorizzazione.

Modellazione HBIM

Director's House

6.1 Autodesk Recap Pro

Il dataset utilizzato in Autodesk Recap Pro corrisponde al modello più completo e affidabile ottenuto durante l'intera campagna di rilievo. A partire dall'elaborazione condotta in Agisoft Metashape è stato generato ed esportato un file in formato .las, derivante dalla fusione delle acquisizioni laser scanner del Leica RTC360 con l'intero set fotografico prodotto con la Sony A7RIII. Questo processo integrato ha permesso di ottenere una nuvola di punti caratterizzata da un'elevata precisione geometrica, da una copertura uniforme dell'edificio e da una qualità visiva particolarmente dettagliata.

Il modello risultante rappresenta la ricostruzione tridimensionale più solida e accurata disponibile della Director's House, poiché combina la precisione metrica delle scansioni LiDAR con la ricchezza cromatica e l'alta definizione del dataset fotografico. L'analisi comparativa con altri sistemi acquisitivi ha confermato la superiorità del modello integrato, rendendolo il riferimento ideale per l'avvio del processo di modellazione HBIM.

Una volta esportata da Metashape, la nuvola in formato .las è stata quindi importata in Autodesk Recap Pro, dove è stata ottimizzata e convertita nel formato .rcp, necessario per il suo utilizzo in Autodesk Revit. Questo passaggio ha garantito la continuità del workflow e ha permesso di disporre di un modello stabile, coerente e pronto per la fase di modellazione tridimensionale.

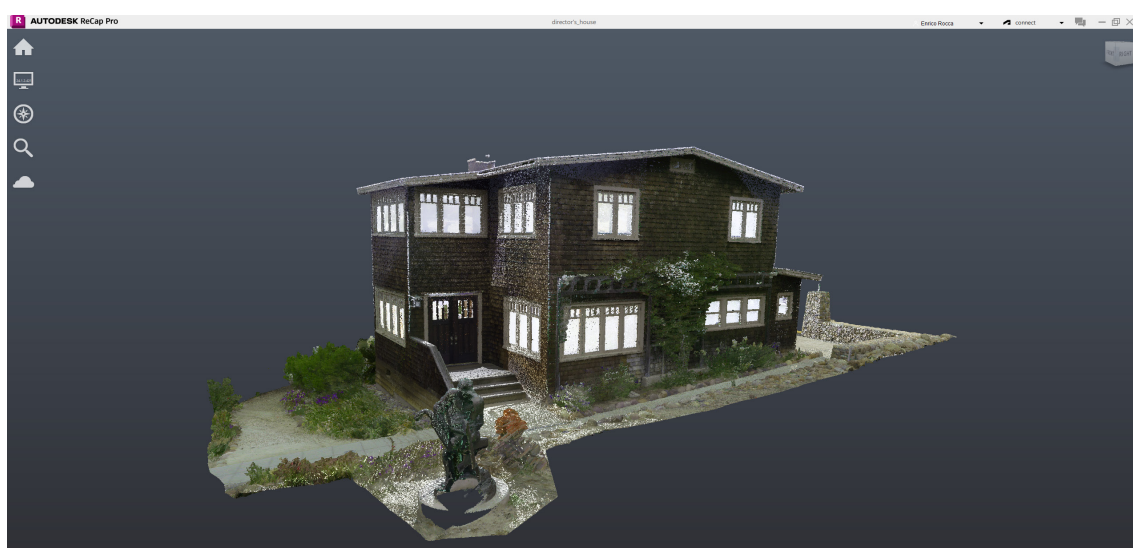


Figura 96: modello 3D nuvola di punti (fonte: screenshot Autodesk Recap Pro)

6.2 Autodesk Revit

Passando all'interno del software Autodesk Revit, la nuvola di punti è stata importata nel formato .rcp. In questa fase si è presentata una prima criticità legata alla gestione delle coordinate globali condivise, poiché il software non era in grado di riconoscerle correttamente.

Per risolvere il problema è stato necessario intervenire nuovamente in Autodesk Recap Pro, dove si è definito un nuovo sistema di coordinate locali. L'operazione è stata condotta manualmente, modificando l'origine tramite lo strumento "Update Origin", così da rendere il modello compatibile con l'ambiente di lavoro di Revit.

Una volta completata questa fase di riallineamento, l'importazione del file in Revit è avvenuta selezionando come opzione di posizionamento "a coordinate condivise", garantendo così la corretta collocazione spaziale della nuvola.

All'interno del software si è proceduto, come primo passaggio operativo, alla definizione dei piani di riferimento, ottenuti mediante la tracciatura di sezioni sulla nuvola di punti.

Successivamente è stato analizzato l'utilizzo del plugin Scan Terrain per Revit. Questo strumento consente di generare superfici topografiche direttamente a partire da nuvole di punti, offrendo un flusso di lavoro più diretto e preciso per la modellazione del terreno in ambiente HBIM.

Il plugin si distingue per la capacità di interpretare i dati altimetrici contenuti nella nuvola di punti e convertirli automaticamente in una superficie topografica nativa di Revit, preservando la coerenza geometrica del rilievo e riducendo gli errori derivanti da semplificazioni o interpolazioni manuali.

Nel caso specifico, il plugin Scan Terrain è stato utilizzato per ricostruire il modello morfologico dell'area circostante la Director's House, ottenendo una superficie accurata e coerente con i dati acquisiti durante la campagna di rilievo.

A partire dalla nuvola di punti importata in Revit, mediante il riquadro di selezione (Section Box) è stata isolata unicamente la porzione relativa al terreno, escludendo gli elementi architettonici dell'edificio e della vegetazione. Successivamente è stato avviato

il plugin per la generazione automatica della superficie topografica.

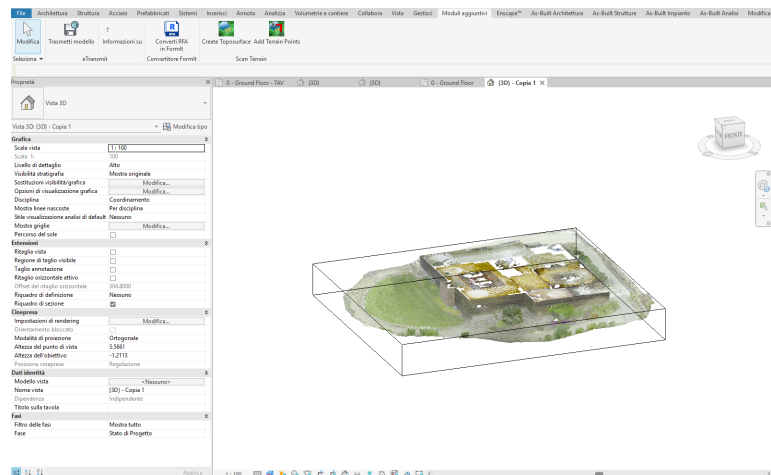


Figura 97: section box nuvola di punti (fonte: screenshot Autodesk Revit 2024)

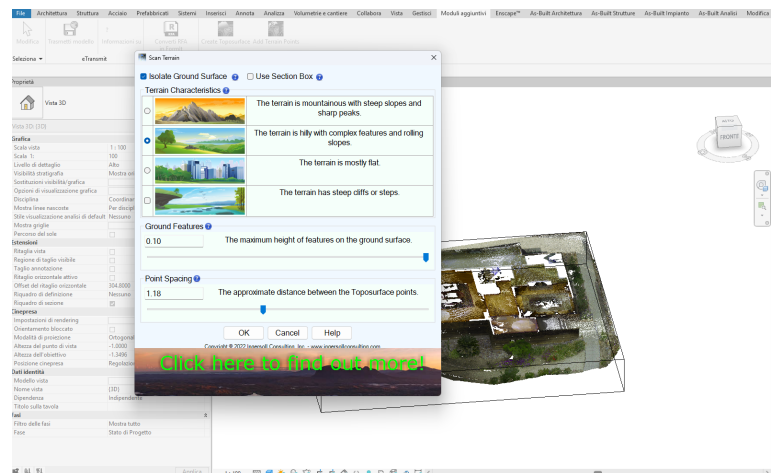


Figura 98: plugin Scan Terrain (fonte: screenshot Autodesk Revit 2024)

All'interno della finestra di configurazione del plugin, sono stati impostati i seguenti parametri:

- Caratteristiche del terreno: selezionata l'opzione "The terrain is mostly flat", corrispondente a un terreno prevalentemente pianeggiante;
- Ground Features: definita a 0,10 m l'altezza massima delle irregolarità presenti sulla superficie del terreno, per limitare la semplificazione geometrica;
- Point Spacing: impostata una distanza approssimativa tra i punti della superficie pari a 1,18 m, al fine di ottenere un equilibrio tra dettaglio e peso computazionale del modello.

Dopo alcuni minuti di elaborazione, il plugin ha generato una superficie topografica continua, rappresentativa del terreno reale, pronta per essere utilizzata nella generazione del solido topografico.

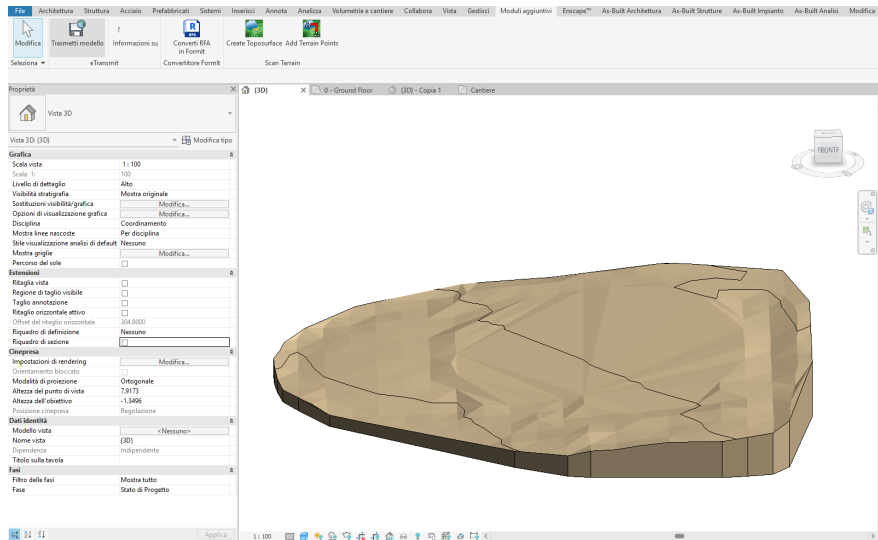


Figura 99: generazione solido topografico (fonte: screenshot Autodesk Revit 2024)

Poiché all'interno dell'area di progetto sono presenti percorsi pavimentati e zone verdi si è deciso di modellarli uno ad uno attraverso anche all'utilizzo di volumi di sottrazione per adattare le varie porzioni del terreno alle curve di livello effettive.

In questo modo è stata completata la ricostruzione tridimensionale del modello morfologico dell'area della Director's House, garantendo una restituzione coerente e funzionale ai successivi sviluppi del modello HBIM.

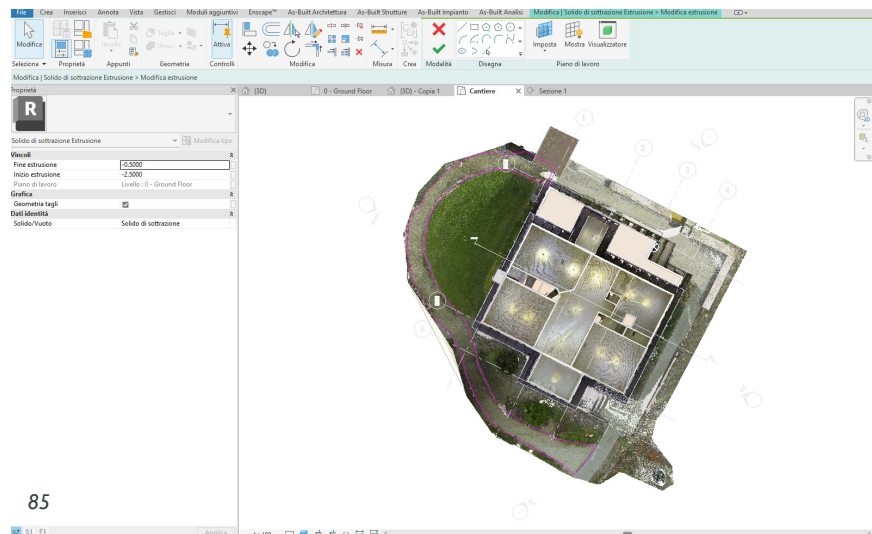


Figura 100: percorso sterrato solido di sottrazione (fonte: screenshot Autodesk Revit 2024)

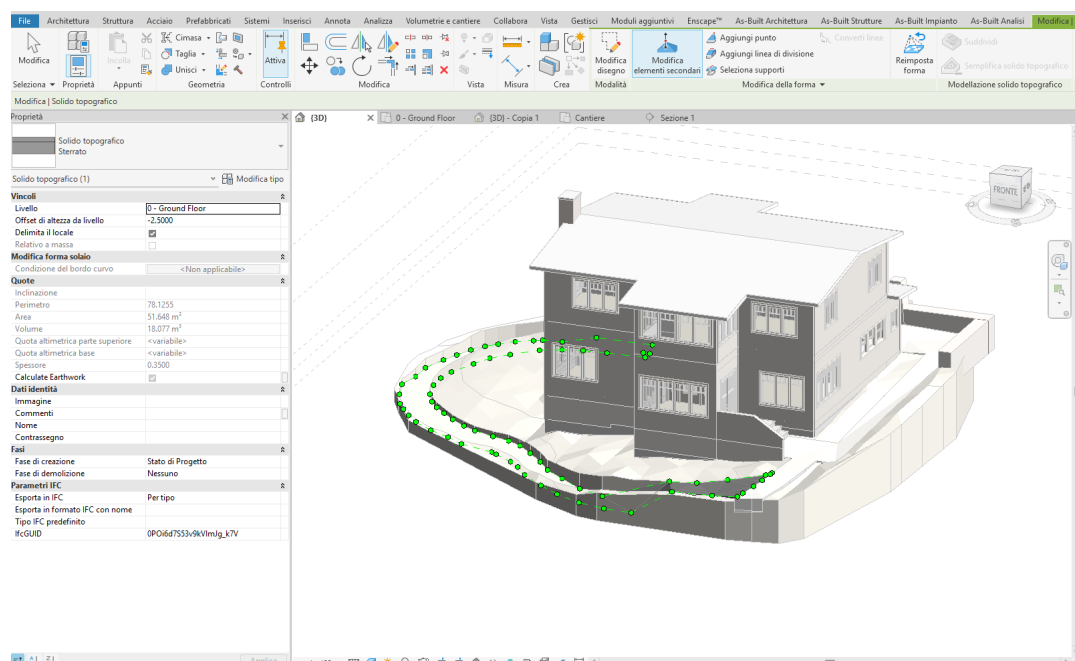


Figura 101: gestione livelli percorso sterrato (fonte: screenshot Autodesk Revit 2024)

È stato anche analizzato l'utilizzo di un altro plugin, AS-BUILT for Revit – FARO. Strumento dedicato all'integrazione in maniera diretta delle nuvole di punti nei flussi di lavoro HBIM, consentendo la modellazione e la verifica metrica di elementi architettonici all'interno di Revit.

Pensato strettamente al settore as-built e dei processi scan to BIM, il plugin ha a disposizione strumenti utili alla costruzione semiautomatica di muri, solai e altre componenti edilizie basandosi sui dati tridimensionali da rilievi laser scanner e fotogrammetrici.

Nel nostro caso è stato analizzato e testato nella prima fase per la modellazione diretta dei muri esterni e interni della Director's House. Il software permette di estrarre in modo semi-automatico le geometrie dai dati della nuvola, generando delle superfici verticali, e volumi aderenti alle porzioni scansionate.

Tuttavia, nonostante la rapidità di elaborazione, è stata preferita la modellazione manuale tradizionale che si è dimostrata più precisa e controllabile.

Si è quindi passati alla modellazione della struttura muraria del corpo dell'edificio, attraverso la creazione di vari tipi di muri, distinti tra esterno ed interno, seguendo la scansione delle nuvole di punti. Una volta realizzato lo scheletro dell'edificio è stata

anche la realizzazione della pavimentazione interna.

In fase successiva è stata affrontata la modellazione del camino esterno visibile sul prospetto ovest dell'edificio.

L'elemento, caratterizzato da una geometria articolata e da variazioni di sezione lungo lo sviluppo in altezza, è stato realizzato mediante la funzione di creazione di un componente di modello locale generico, che consente di costruire forme personalizzate non appartenenti a categorie predefinite del modello architettonico.

All'interno dell'ambiente di modellazione locale, è stata impostata una sequenza di volumi solidi distinti, ciascuno corrispondente a una diversa sezione del camino.

Per ciascun livello è stata definita la sagoma di riferimento in pianta e la relativa estrusione verticale fino all'altezza desiderata, verificando di volta in volta la continuità geometrica tra le parti e la corretta corrispondenza con la nuvola di punti di riferimento.

Questo approccio modulare ha permesso di ricostruire fedelmente l'andamento del camino reale, rispettandone le variazioni dimensionali e le inclinazioni, garantendo al contempo un controllo preciso sulle proporzioni e sulla posizione rispetto alle murature dell'edificio.

Una volta completata la modellazione, il componente è stato assegnato alla categoria Generic Model e posizionato in modo coerente con il contesto architettonico generale, verificando l'allineamento con le sezioni e i prospetti principali.

Stesso ragionamento e procedura è stata utilizzata per la modellazione della scala esterna ad est posizionata sul prospetto est.

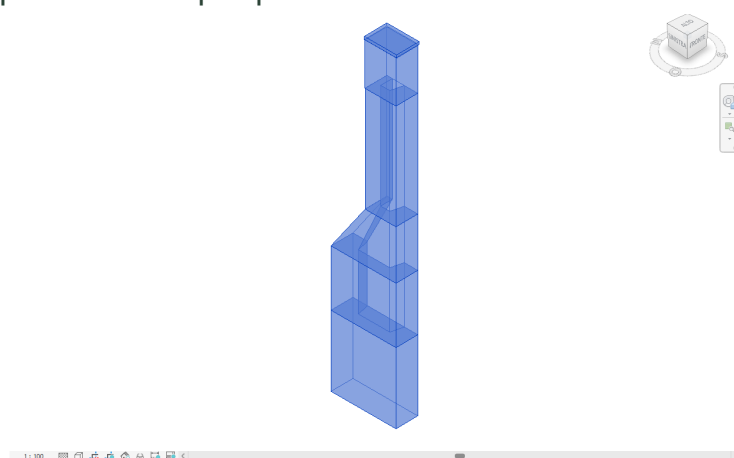


Figura 102: modellazione locale generica camino (fonte: screenshot Autodesk Revit 2024)

6.2.1 Modellazione porte

Parte fondamentale del progetto è stata la costruzione dettagliata e accurata degli infissi esterni e interni dell'intero edificio. Il processo è iniziato con la modellazione della porta d'ingresso principale sul prospetto est, che consente l'accesso a un piccolo atrio collegato al corridoio principale della Director's House.

Il workflow seguito per la realizzazione di questa tipologia di infissi, poi esteso anche alle altre porte dell'edificio, è articolato nei seguenti passaggi.

In primo luogo è stata posizionata una sezione in corrispondenza della porta, in modo da visualizzare chiaramente la nuvola di punti e la scansione laser relativa all'oggetto da modellare. A questo punto si è proceduto con la quotatura diretta di tutti gli elementi di dettaglio rilevanti mediante gli strumenti di annotazione al fine di ottenere un riferimento metrico preciso e coerente con i dati di rilievo.

La stessa operazione è stata ripetuta su due sezioni ortogonali, una trasversale e una longitudinale, così da controllare accuratamente ogni dimensione dell'infisso.

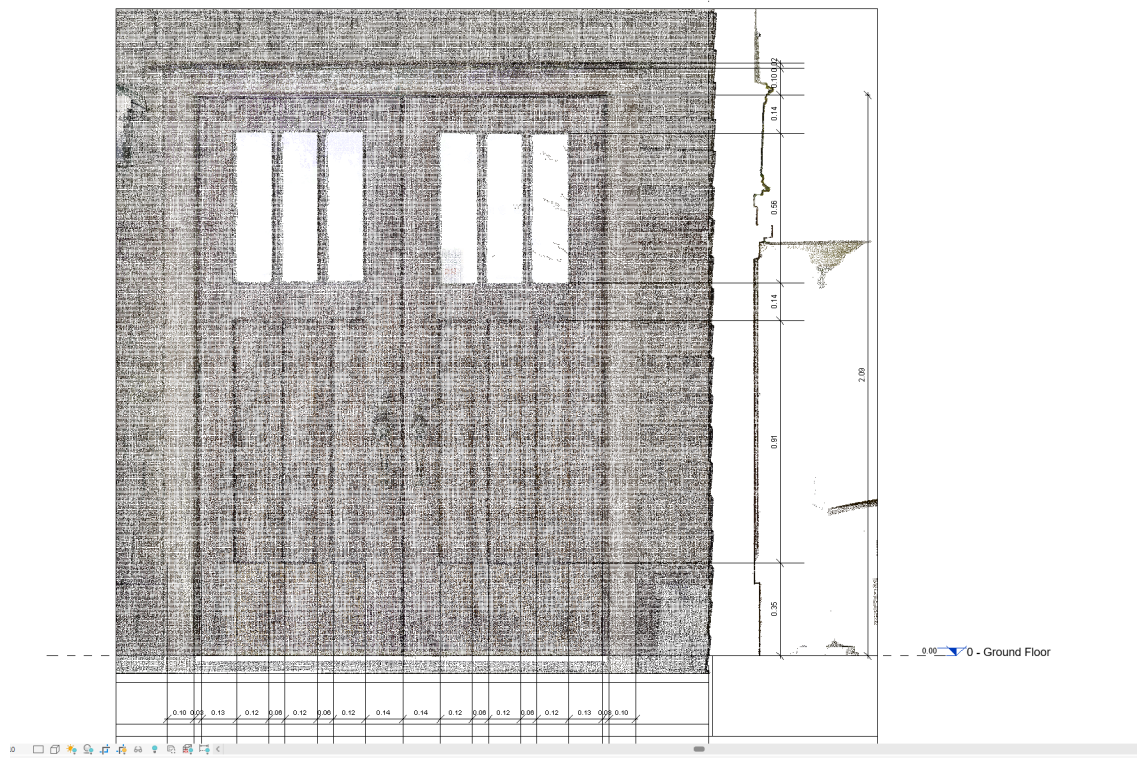


Figura 103: quotatura annotativa per realizzazione famiglia porta ingresso (fonte: screenshot Autodesk Revit 2024)

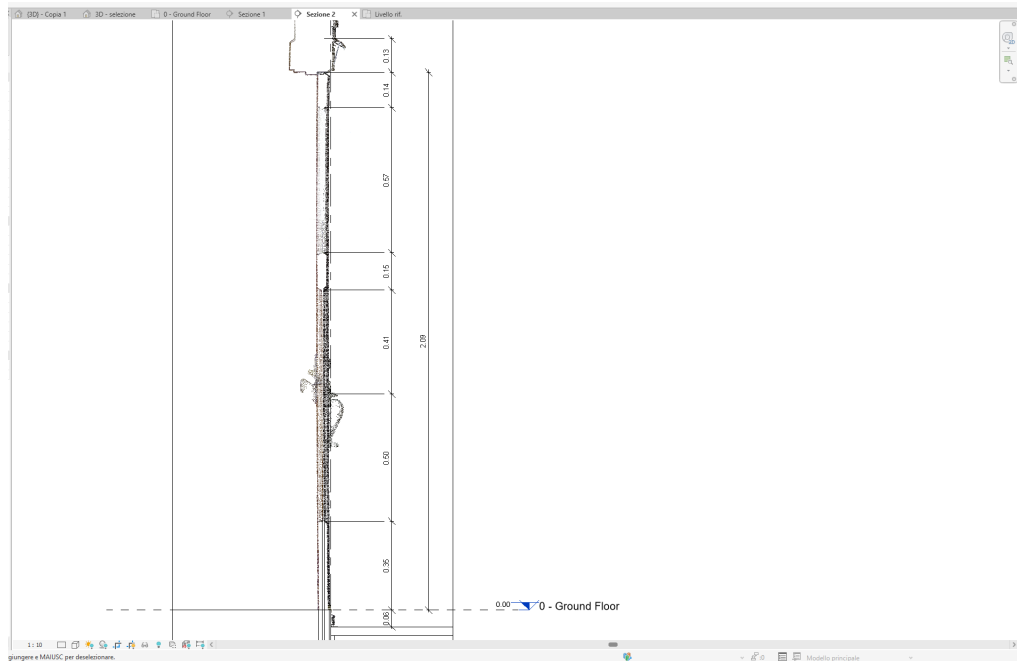


Figura 104: quotatura annotativa per realizzazione famiglia porta ingresso (fonte: screenshot Autodesk Revit 2024)

Completata la fase di analisi, si è passati alla modellazione vera e propria, avviando la creazione di una nuova famiglia di porta metrica denominata “door entrance”. Seguendo il profilo della nuvola di punti, è stato dapprima modellato il telaio fisso dell’in-fisso mediante lo strumento di estrusione su percorso, ottenendo la sagoma esatta della struttura lignea originale.

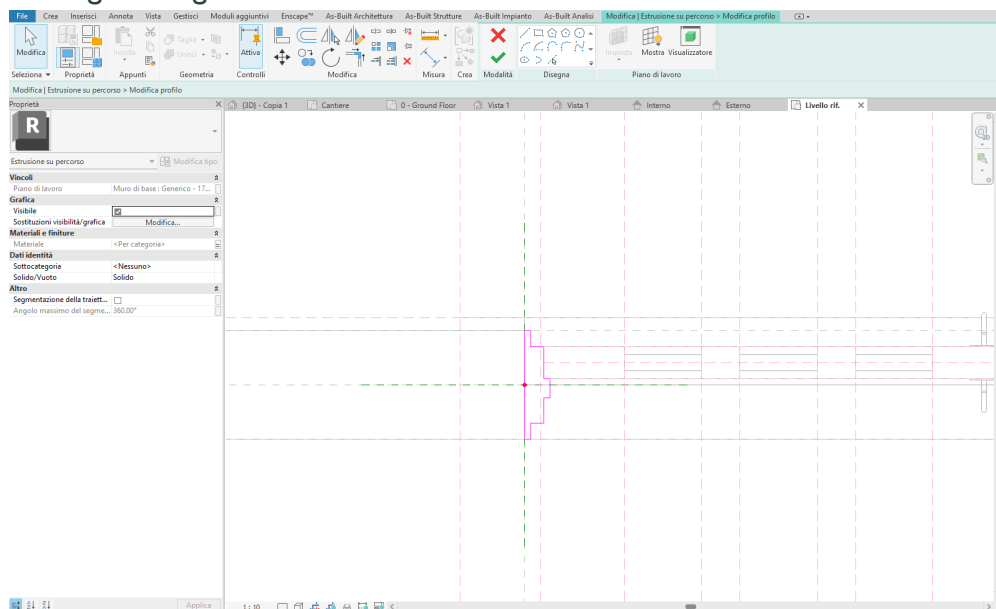


Figura 105: disegno profilo finestra tramite estrusione su percorso su base nuvola di punti (fonte: screenshot Autodesk Revit 2024)

Successivamente sono state realizzate le due ante mobili della porta, definendo la mezzeria dell'infisso tramite un piano di riferimento centrale e utilizzando lo strumento "Crea estrusione". Durante questa fase si è tenuto conto anche delle bucatore vetrate, modellate come sottrazioni di volume, per restituire la corretta configurazione delle parti trasparenti.

Infine, all'interno della stessa famiglia sono state modellate anche le maniglie, tramite la creazione di un modello generico dettagliato, al fine di completare l'infisso con tutti i suoi componenti funzionali.

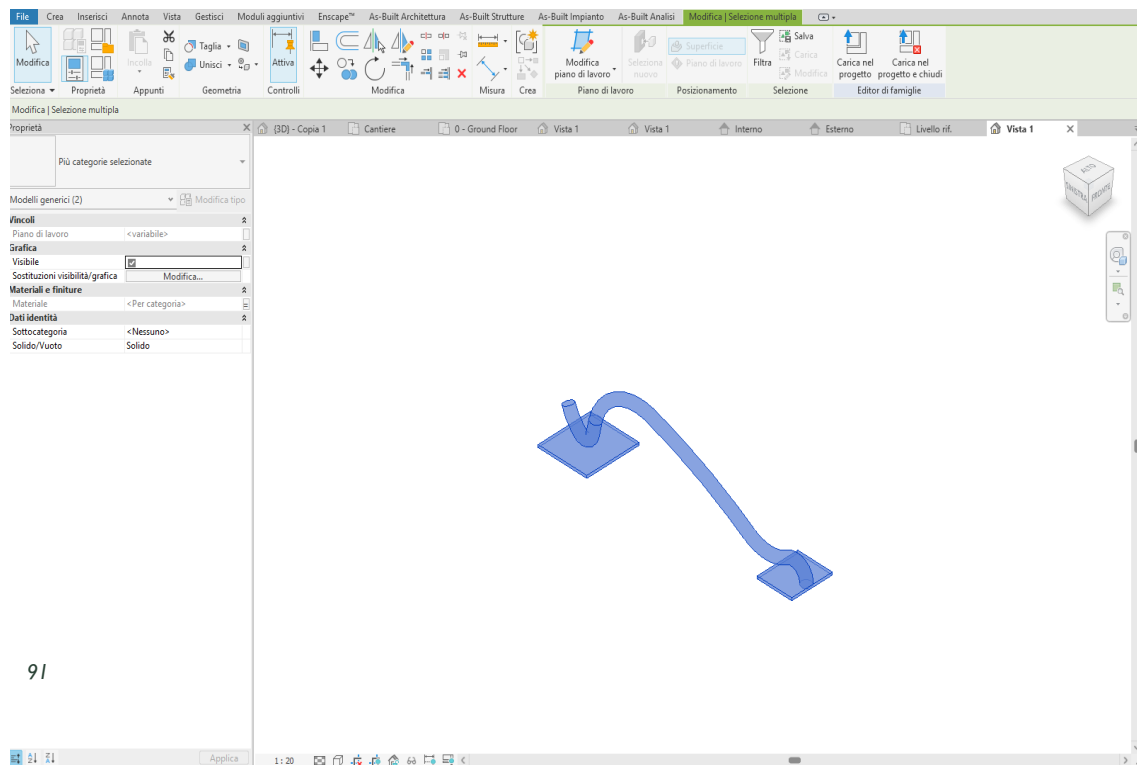


Figura 106: modellazione maniglia porta ingresso (fonte: screenshot Autodesk Revit 2024)

All'interno della famiglia, i materiali costruttivi sono stati distinti e gestiti mediante parametri condivisi di tipo, così da garantire un controllo coerente delle proprietà fisiche e grafiche di ciascun componente. Tali parametri sono stati poi assegnati una volta importata la famiglia nel progetto principale, consentendo di mantenere una gestione univoca dei materiali e una corretta inte-

roperabilità con gli altri elementi del modello.

Completata la definizione della famiglia, l'infisso è stato inserito nel modello architettonico e posizionato nella sua sede reale in corrispondenza della nuvola di punti. In questa fase sono state condotte verifiche di congruenza metrica e geometrica tra la modellazione e il rilievo tridimensionale, confrontando le sezioni di controllo e i dati acquisiti in fase di scansione. Questo workflow è stato replicato anche per le due porte interne in corrispondenza del corridoio centrale al piano terreno.

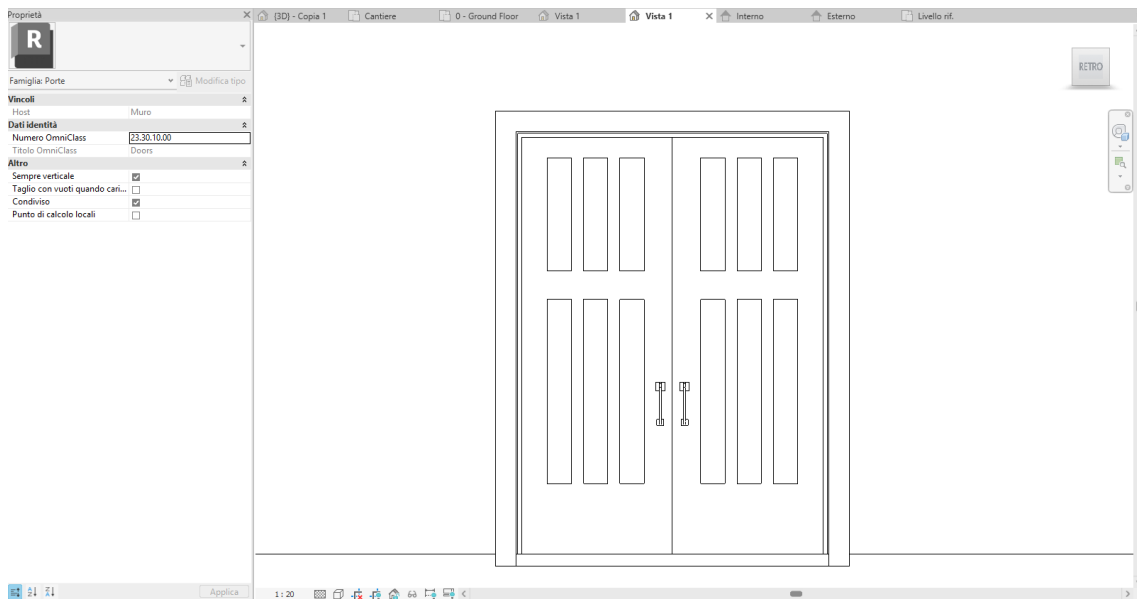


Figura 107: modellazione maniglia porta ingresso (fonte: screenshot Autodesk Revit 2024)

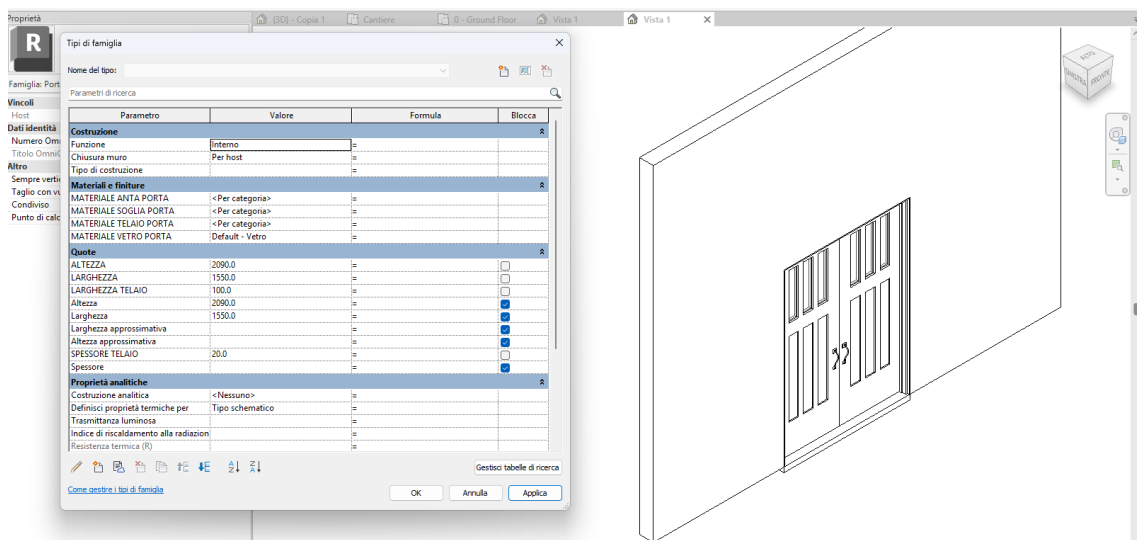


Figura 108: famiglia porta ingresso (fonte: screenshot Autodesk Revit 2024)

Il medesimo procedimento è stato adottato per la realizzazione della seconda porta esterna, corrispondente all'accesso secondario alla struttura, anch'esso situato sul prospetto est. L'unica variazione riguarda la modellazione di una differente tipologia di maniglia, progettata per riprodurre con maggiore fedeltà le caratteristiche dell'elemento reale.

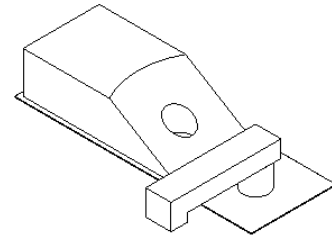


Figura 109: modellazione maniglia porta secondaria d'ingresso (fonte: screenshot Autodesk Revit 2024)

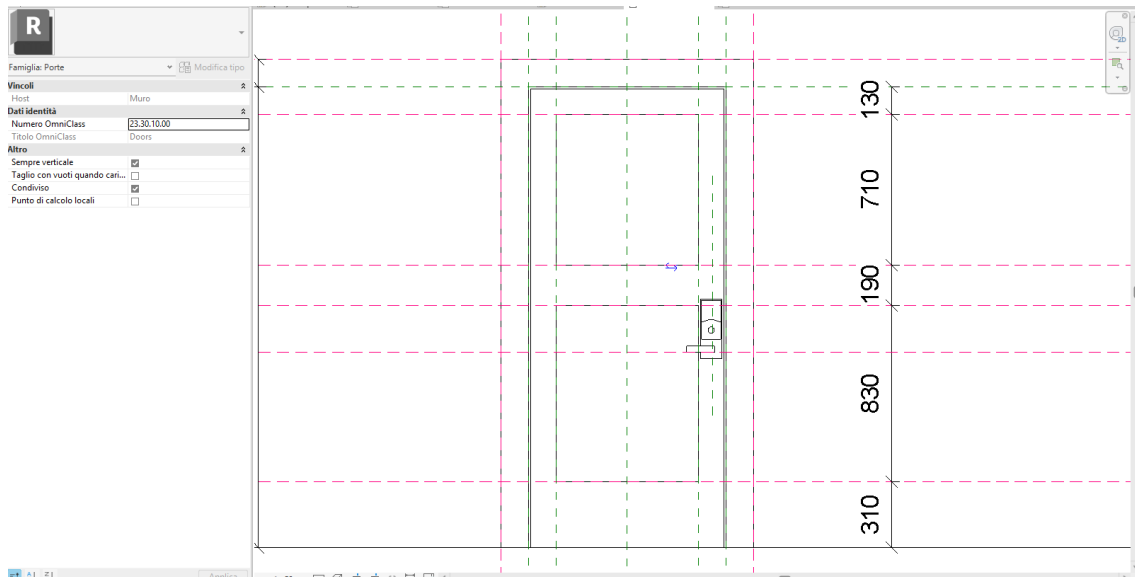


Figura 110: famiglia secondaria d'ingresso (fonte: screenshot Autodesk Revit 2024)

Per quanto riguarda la modellazione delle porte interne, si è scelto di adottare una struttura di famiglie nidificate, al fine di ottimizzare il processo di modellazione e garantire una gestione più flessibile degli elementi simili tra loro.

In Revit, una famiglia nidificata è una famiglia caricabile inserita all'interno di un'altra famiglia. Questa logica gerarchica consente di suddividere la modellazione in componenti indipendenti (ad esempio anta, maniglia, telaio, ecc.), che vengono poi richiamati nella famiglia principale. Tale approccio risulta particolarmente utile in presenza di elementi ripetitivi ma con leggere variazioni dimensionali o morfologiche, poiché permette di aggiornare rapidamente le parti comuni senza dover ricostruire ogni singolo oggetto.

Nel caso specifico, le porte interne della Director's House presentano caratteristiche formali simili con variazioni minime di larghezza e altezza, e differenze legate alla presenza di pomello o maniglia. Per questo motivo, è stata realizzata un'unica famiglia parametrica principale, destinata a essere caricata nel progetto e differenziata mediante la creazione di diversi "tipi" di porta interna, gestiti attraverso parametri di tipo.

La modellazione è partita da una nuova famiglia caricabile "porta metrica", all'interno della quale sono stati impostati i parametri di altezza e larghezza tramite appositi piani di riferimento, insieme alla profondità e spessore del telaio fisso. Per la costruzione dell'anta, invece, si è scelto di utilizzare una famiglia nidificata basata su un modello generico metrico basato su linea, in modo da poter controllare la sua lunghezza in relazione diretta ai parametri della porta principale.

All'interno di questa famiglia nidificata sono stati modellati anche gli elementi di dettaglio, ovvero pomello e maniglia, realizzati come modelli generici metrici basati su superficie. Entrambi sono stati associati a parametri grafici di visibilità, che consentono, direttamente dal progetto, di attivare o disattivare la presenza del pomello o della maniglia a seconda del tipo di porta selezionato, in modo da rispecchiare la configurazione reale rilevata nel modello.

Per garantire una maggiore flessibilità in fase di utilizzo, sono stati impostati anche controlli di inversione (Flip Controls) all'interno della famiglia principale, così da gestire rapidamente il verso di apertura dell'anta.

È stato inoltre creato un parametro aggiuntivo denominato "Apertura porta", che consente di definire l'angolo di rotazione dell'anta e di visualizzare in pianta l'apertura desiderata in modo dinamico, direttamente all'interno del progetto.

Infine, per garantire una corretta rappresentazione materica, sono stati impostati parametri di materiale condivisi, assegnabili e modificabili dal progetto principale, permettendo di controllare in modo coerente le finiture e i materiali di tutti gli infissi interni.

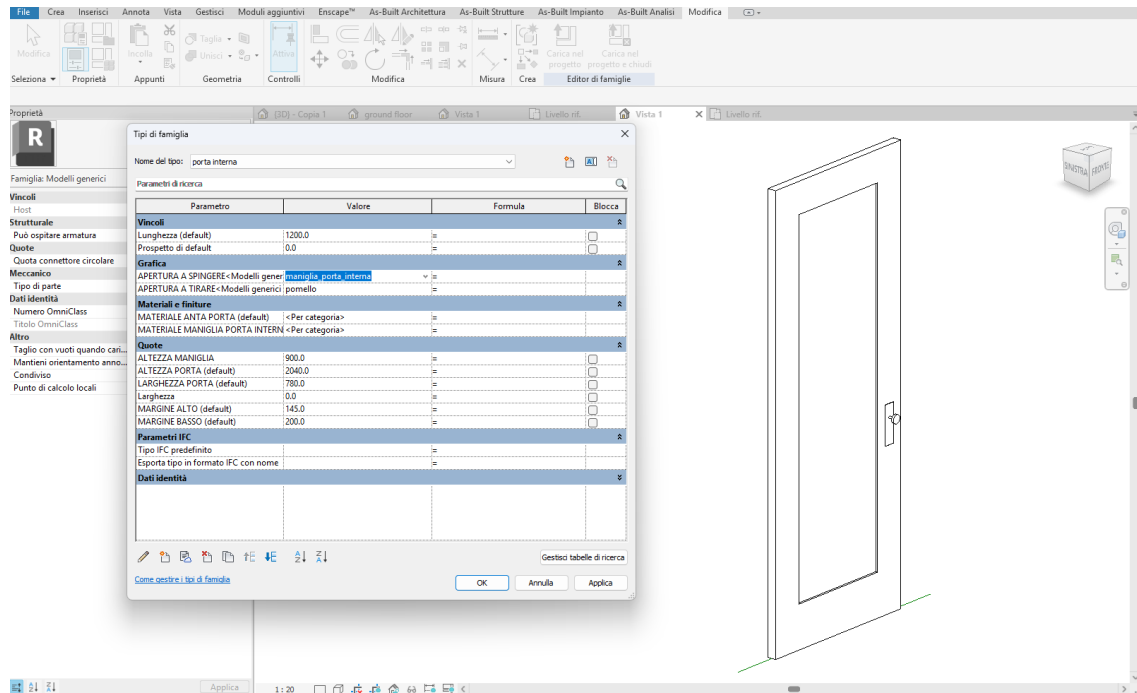


Figura I I 1: famiglia porta interna (fonte: screenshot Autodesk Revit 2024)

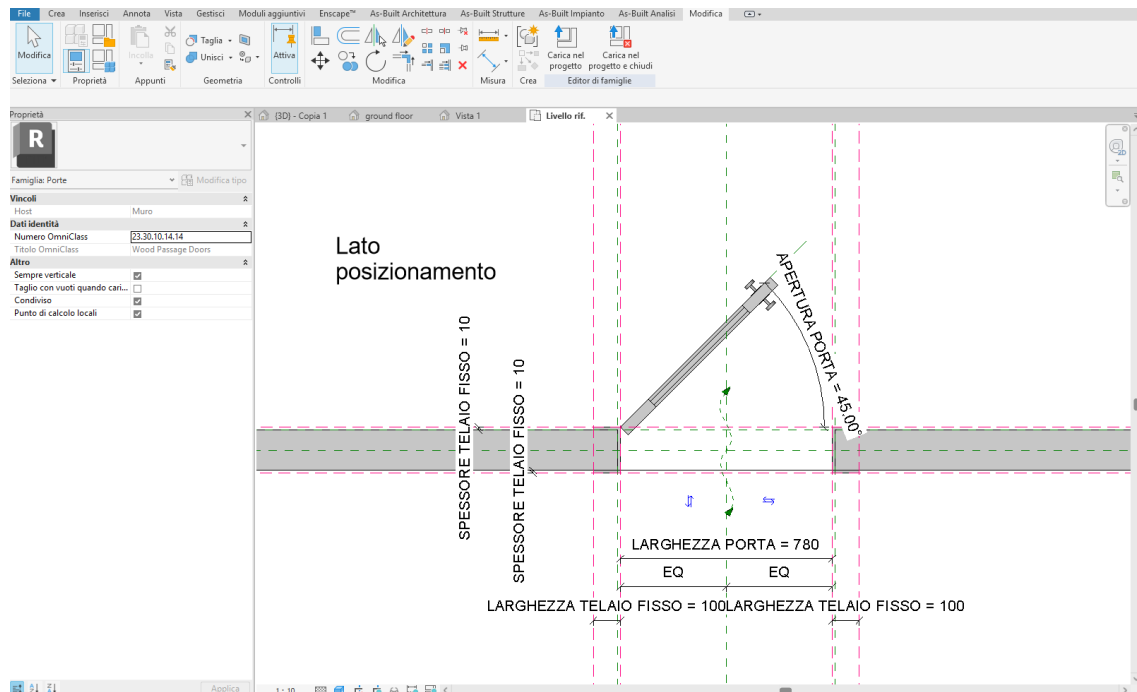


Figura I I 2: vista in pianta famiglia porta interna (fonte: screenshot Autodesk Revit 2024)

6.2.2 Modellazione finestre

Completata la modellazione delle porte, si è passati alla costruzione delle finestre, elemento fondamentale per la definizione accurata dell'involucro edilizio. Anche in questo caso sono state sviluppate famiglie dedicate, in modo da rappresentare con la massima fedeltà possibile le diverse tipologie presenti nell'edificio.

Il processo di modellazione ha seguito un workflow replicabile, adatto alle diverse configurazioni rilevate: le finestre della Director's House si differenziano infatti non solo per le dimensioni complessive, ma anche per numero di ante e caratteristiche geometriche specifiche.

Il primo passo consiste nel posizionamento di due sezioni ortogonali, una longitudinale e una trasversale, in corrispondenza della finestra da modellare, così da poter analizzare con precisione la nuvola di punti.

In queste viste vengono annotate tutte le misure significative (larghezza, altezza, spessore del telaio, profondità del davanzale, ecc.) utilizzando gli strumenti di quotatura, per ottenere un riferimento metrico dettagliato e coerente con il rilievo.

La modellazione inizia con la creazione di una nuova famiglia caricabile di tipo "modello generico basato su muro", che costituisce la struttura principale della finestra. All'interno di questa famiglia, nella vista "lato posizionamento", vengono tracciati i piani di riferimento e ad essi associati i parametri principali di larghezza, altezza, quota della sottofinestra, spessore del telaio e del davanzale.

Segue la definizione della bucatura muraria mediante lo strumento "Crea apertura" di Revit. In vista di pianta vengono impostati i vincoli parametrici per il telaio e per il davanzale, in modo che questi si adattino automaticamente nel caso di modifiche dimensionali della finestra.

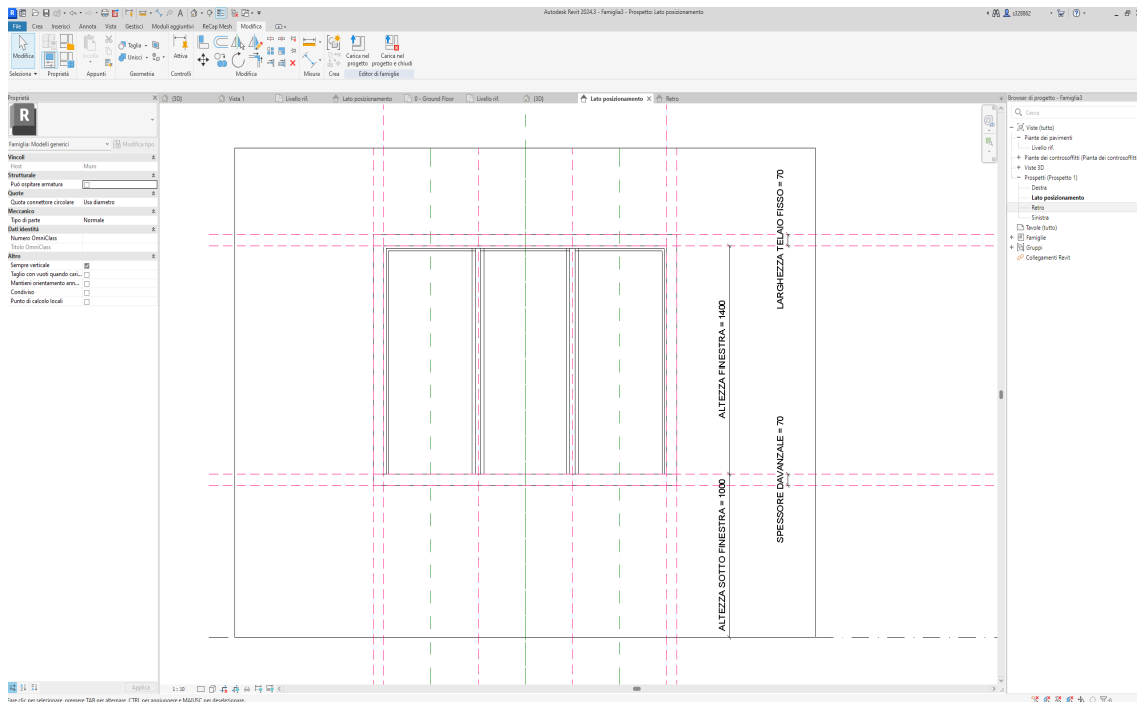


Figura 113: famiglia nidificata finestra 3 ante: creazione famiglia generatrice vista prospetto (fonte: screenshot Autodesk Revit 2024)

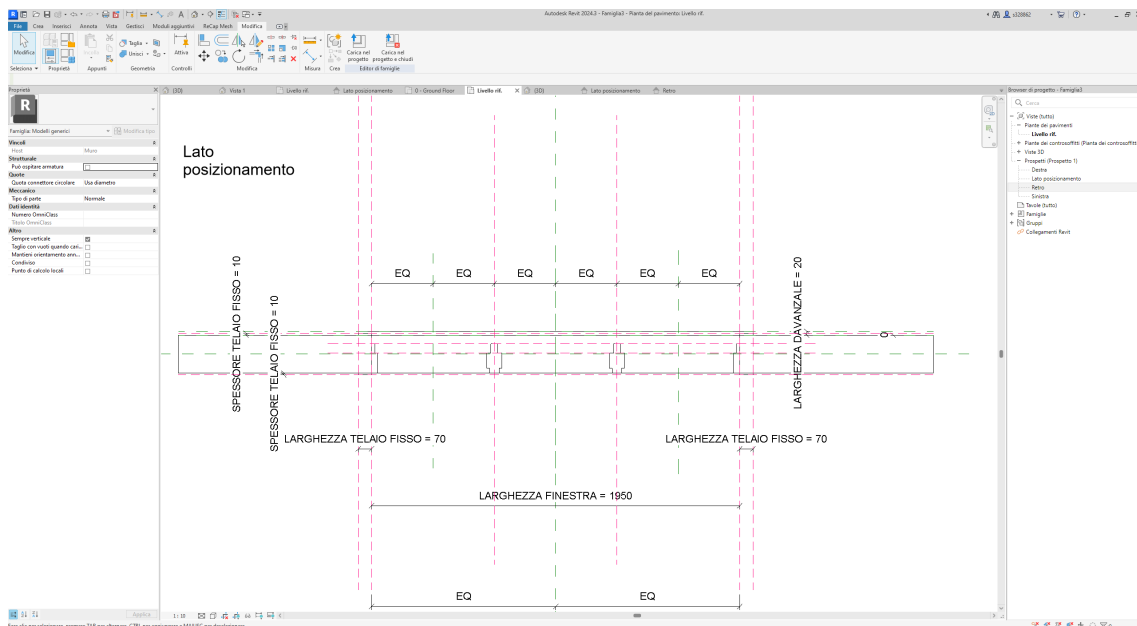


Figura 114: famiglia nidificata finestra 3 ante: creazione famiglia generatrice vista pianta (fonte: screenshot Autodesk Revit 2024)

Il passo successivo riguarda la modellazione dei telai fissi, sui quali poggiano le ante, realizzati tramite lo strumento “estrusione su percorso”. Si procede quindi al tracciamento delle linee di riferimento corrispondenti alla posizione effettiva delle ante, passaggio preliminare alla loro costruzione.

Le ante vengono create come famiglie nidificate, basate su un modello generico metrico basato su linea. All'interno di questa famiglia si impostano piani di riferimento e parametri di controllo relativi alla suddivisione delle porzioni finestrate e ai profili dei montanti, in modo da rispecchiare la configurazione reale dell'infisso.

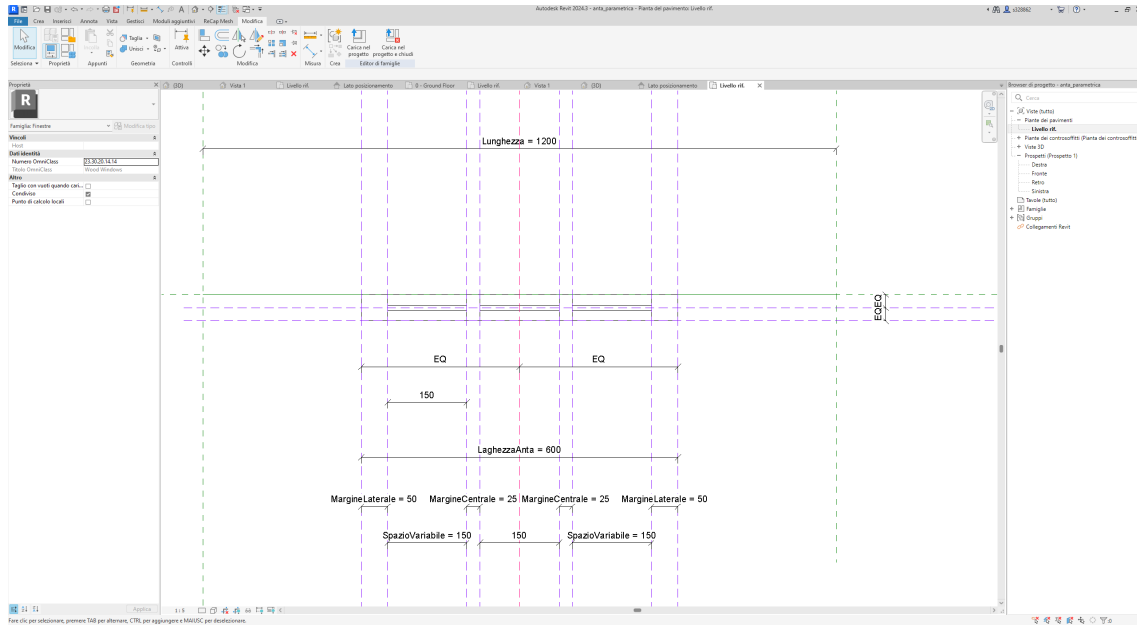


Figura 115: famiglia nidificata anta finestra, vista pianta (fonte: screenshot Autodesk Revit 2024)

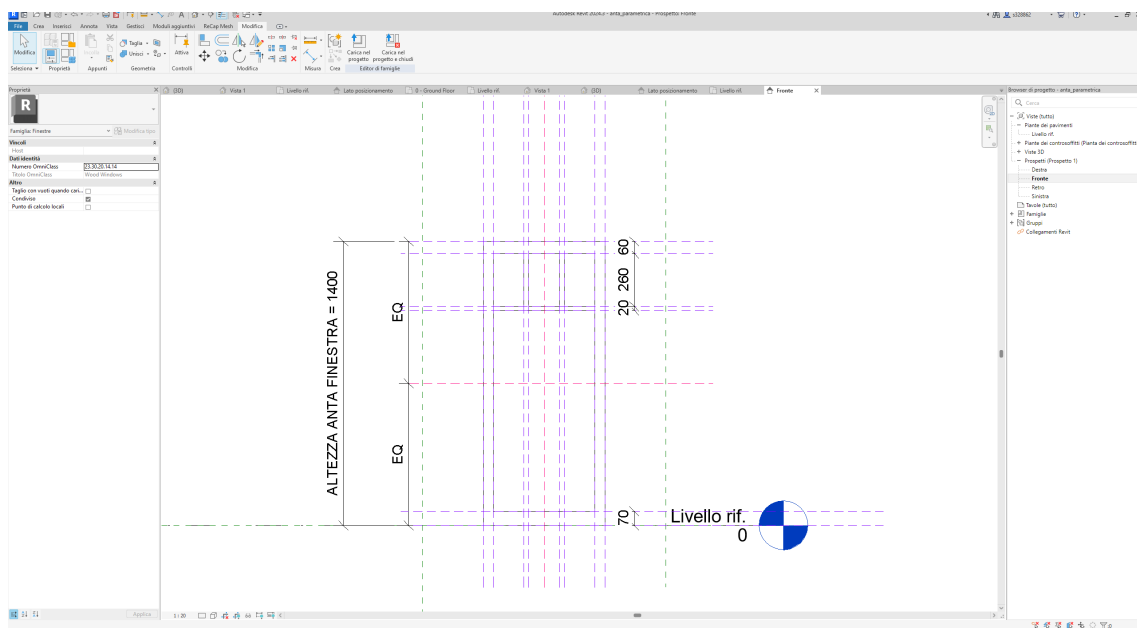


Figura 116: famiglia nidificata anta finestra, vista pianta (fonte: screenshot Autodesk Revit 2024)

Attivando l'opzione di condivisione della famiglia nidificata, ciascuna anta viene posizionata sulle linee di riferimento precedentemente tracciate nella famiglia principale. Il risultato finale è una famiglia completa e parametrica, pronta per essere caricata e collocata nel progetto in corrispondenza delle finestre reali.

Grazie all'impostazione dei parametri di tipo e alla struttura modulare del modello, la famiglia è facilmente adattabile a diverse configurazioni: per una finestra a tre ante è sufficiente modificare le dimensioni della famiglia principale, mantenendo la coerenza geometrica e la corretta distribuzione delle ante.

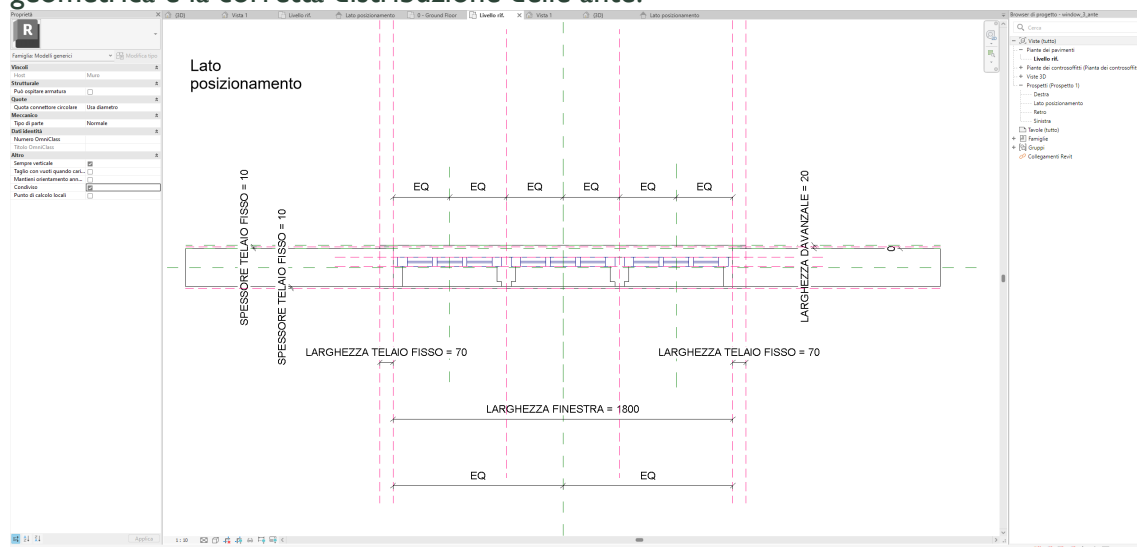


Figura 117: famiglia finestra 3 ante completa, vista pianta (fonte: screenshot Autodesk Revit 2024)

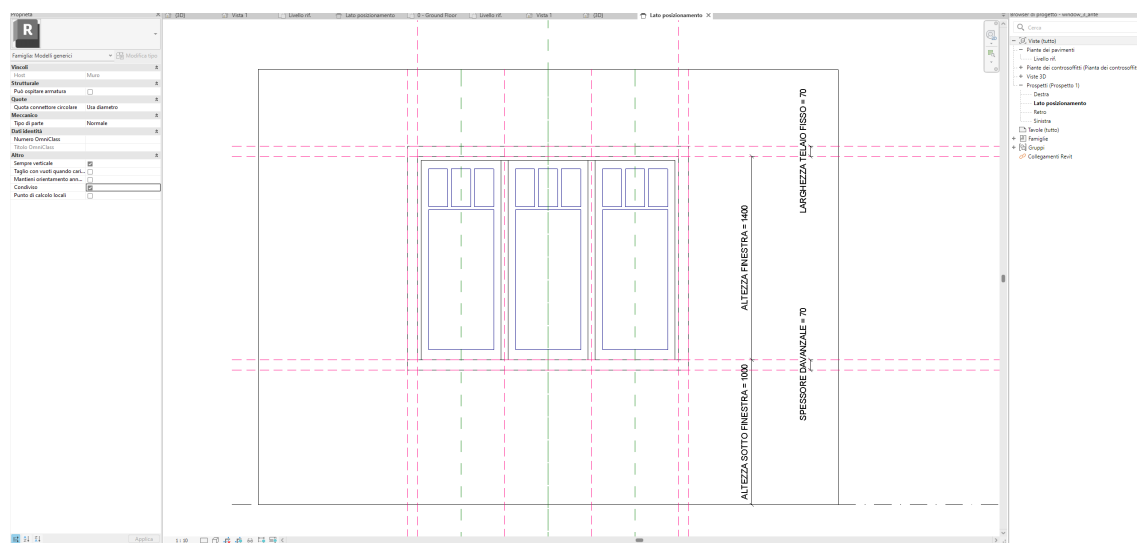


Figura 118: famiglia finestra 3 ante completa, vista prospetto (fonte: screenshot Autodesk Revit 2024)

Tipi di famiglia

Nome del tipo: 1,95m x 1,4m

Parametri di ricerca

Parametro	Valore	Formula	Blocca
Vincoli			
Prospetto di default	0,0	=	<input type="checkbox"/>
Costruzione			
Tipo di costruzione		=	
Materiali e finiture			
MATERIALE ANTA FINESTRA	<Per categoria>	=	
MATERIALE DAVANZALE	<Per categoria>	=	
MATERIALE VETRO PORTA	Default - Vetro	=	
Quote			
LARGHEZZA FINESTRA	1950.0	=	<input type="checkbox"/>
ALTEZZA FINESTRA	1400.0	=	<input type="checkbox"/>
LARGHEZZA ANTA FINESTRA	600.0	= (LARGHEZZA FINESTRA - 2 mm * 25 - 2 mm * 50) / 3	<input type="checkbox"/>
ALTEZZA ANTA FINESTRA	1375.0	= ALTEZZA FINESTRA - 25 mm	<input type="checkbox"/>
ALTEZZA SOTTO FINESTRA	1000.0	=	<input type="checkbox"/>
SPESSORE DAVANZALE	70.0	=	<input type="checkbox"/>
LARGHEZZA DAVANZALE	20.0	=	<input checked="" type="checkbox"/>
LARGHEZZA TELAIO FISSO	70.0	=	<input checked="" type="checkbox"/>
SPESSORE TELAIO FISSO	10.0	=	<input checked="" type="checkbox"/>
SpazioVariabile	150.0	= (LARGHEZZA ANTA FINESTRA - 2 mm * 25 - 2 mm * 50) / 3	<input type="checkbox"/>
Altezza approssimativa		=	<input type="checkbox"/>
Larghezza		=	<input type="checkbox"/>
Larghezza approssimativa		=	<input type="checkbox"/>
Altezza		=	<input type="checkbox"/>
Proprietà analitiche			
Definisci proprietà termiche per	Tipo schematico	=	
Costruzione analitica	<Nessuno>	=	
Trasmittanza luminosa		=	
Indice di riscaldamento alla radiazione solare		=	
Resistenza termica (R)		=	
Coefficiente di scambio termico (U)		=	
Parametri IFC			
Operazione		=	
Tipo IFC predefinito		=	
Esporta tipo in formato IFC con nome		=	
Dati identità			

Gestisci tabelle di ricerca

Come gestire i tipi di famiglia

OK Annulla Applica

Figura 119: famiglia nidificata finestra, parametri (fonte: screenshot Autodesk Revit 2024)

Lo stesso procedimento operativo e logica parametrica è stata applicata anche alla modellazione delle altre tipologie di finestre, rispettivamente a quattro, due e una anta, sviluppate come famiglie nidificate derivate dal modello principale.

Ciascuna di esse è stata successivamente inserita all'interno del progetto, mantenendo piena coerenza geometrica e comportamentale grazie all'utilizzo dei parametri condivisi e dei vincoli impostati. Con queste ultime tipologie si conclude la modellazione completa dell'insieme delle finestre nidificate, garantendo un sistema modulare e adattabile a tutte le varianti presenti nell'edificio.

6.2.3 Altre modellazioni

Un'ulteriore fase della modellazione ha riguardato la ricostruzione del particolare rivestimento ligneo che caratterizza le pareti interne della Director's House, elemento distintivo dell'apparato architettonico dell'edificio.

Per ottenere una rappresentazione fedele alla realtà, si è proceduto come di consueto al posizionamento di due sezioni ortogonali in corrispondenza della nuvola di punti del locale di riferimento, così da rilevare e annotare le dimensioni effettive del rivestimento, dei pannelli e dei listelli adiacenti.

La modellazione è stata realizzata attraverso la creazione di un componente di modello locale generico, che ha permesso di operare in maniera flessibile sulle singole superfici.

All'interno di questo ambiente, i rivestimenti lignei sono stati ricostruiti tramite estrusioni modellate sui valori dimensionali ricavati dal rilievo, replicando con accuratezza la disposizione e la scansione dei listelli verticali e orizzontali visibili nella realtà.

Questo approccio ha consentito di ottenere un modello tridimensionale accurato e coerente con l'articolazione materica e geometrica delle pareti originali.

Elemento caratterizzante del rivestimento interno è anche il battiscopa, modellato mediante lo strumento "Wall Sweep" (estrusione lungo il muro) e definito seguendo un profilo metrico personalizzato.

Per il piano terra è stato utilizzato un profilo metrico di 10 cm di altezza, mentre per il piano primo è stato necessario creare un profilo metrico differente, poiché il battiscopa presentava un'altezza di 23 cm.

Ulteriori tipologie di rivestimento presenti in altre aree dell'edificio sono state modellate replicando il medesimo workflow operativo, adattandolo alle diverse caratteristiche geometriche riscontrate nel rilievo.

Figura 123 (sx): profilo metrico battiscopa 23cm (fonte: screenshot Autodesk Revit 2024)

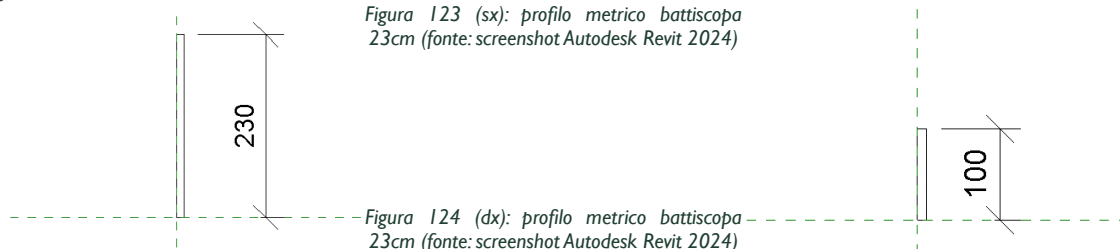


Figura 124 (dx): profilo metrico battiscopa 23cm (fonte: screenshot Autodesk Revit 2024)

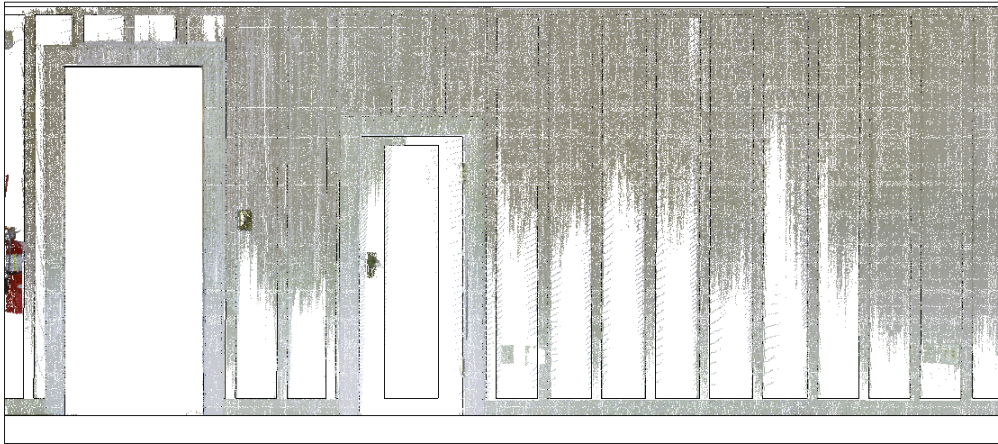


Figura 125: sezione longitudinale nuvola di punti rivestimento ligneo pareti interne (fonte: screenshot Autodesk Revit 2024)

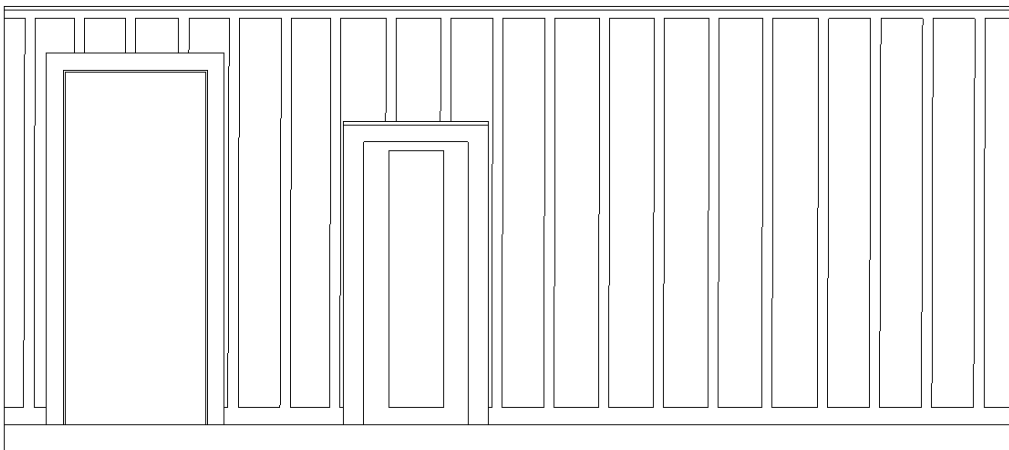


Figura 126: rivestimento ligneo pareti interne, vista prospetto (fonte: screenshot Autodesk Revit 2024)

La scala di collegamento tra piano terra e piano primo è stata realizzata partendo da una famiglia caricabile di tipo “Scale”, successivamente adattata alla configurazione reale del manufatto.

Attraverso la funzione “Crea disegno”, sono stati definiti i profili di alzate, pedate, contorno e percorso scala, calibrando ogni parametro in relazione ai dati ricavati dalla nuvola di punti.

Questo procedimento ha permesso di ottenere una geometria fedele alla realtà costruttiva e di integrare correttamente la scala nel modello architettonico complessivo.

Il corrimano è stato invece modellato come componente di modello locale generico, utilizzando lo strumento “Crea estrusione” per riprodurre con precisione il suo anda-

mento reale e la continuità lungo la rampa.

L'uso combinato di questi strumenti ha consentito di restituire un modello coerente, completo di tutti gli elementi architettonici principali che definiscono lo spazio interno della Director's House.

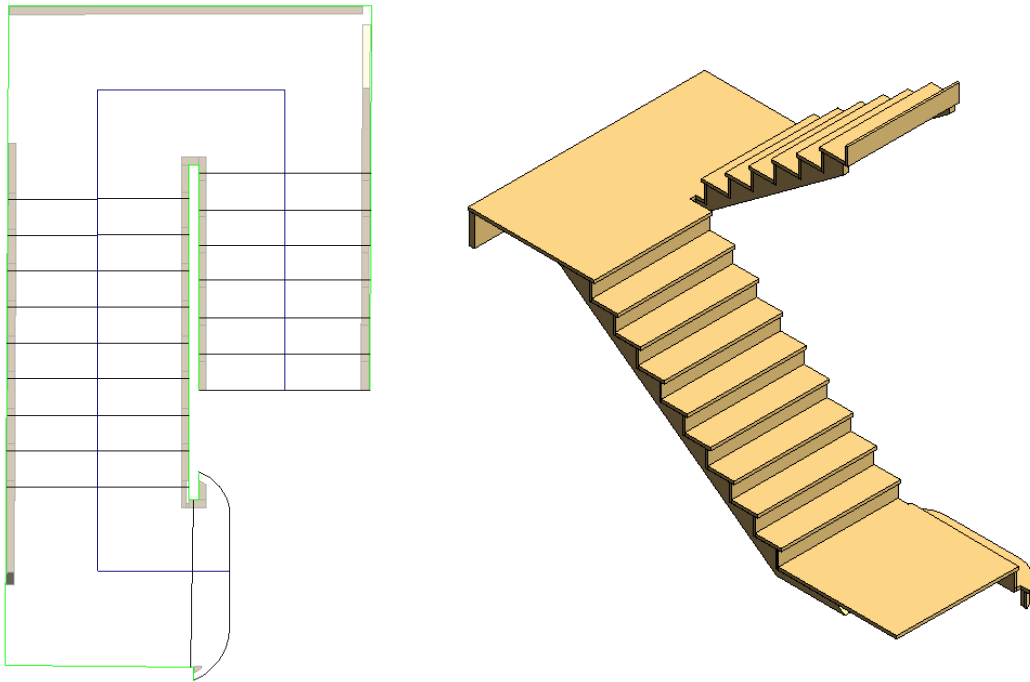


Figura 127: scala di collegamento, vista pianta e 3D (fonte: screenshot Autodesk Revit 2024)

6.2.4 Integrazione delle informazioni nel modello HBIM

Completata la fase di modellazione geometrica della Director's House, il lavoro si è concentrato sulla costruzione di un modello HBIM capace di integrare informazioni storiche, materiche e documentali. L'obiettivo non era più solo rappresentare l'edificio nella sua forma, ma restituire un sistema informativo coerente, in cui ogni oggetto modellato potesse raccontare il proprio ruolo costruttivo, il contesto storico di appartenenza e lo stato conservativo rilevato durante il rilievo. Questo passaggio rappresenta il valore aggiunto dell'intero processo: trasformare un modello tridimensionale in una piattaforma conoscitiva, utile sia per la ricerca sia per la conservazione.

Il primo livello di arricchimento ha riguardato la definizione dei materiali storici all'interno del Browser dei materiali di Revit. Per ogni componente costruttiva significativa, il rivestimento esterno in scandole di sequoia, la boiserie interna, l'intonaco storico applicato su listelli lignei, il legno massello delle porte e quello verniciato degli infissi, fino al pavimento tipico delle abitazioni californiane dei primi decenni del Novecento, è stata predisposta una scheda dedicata, compilata con descrizioni dettagliate, classe del materiale e parole chiave utili alla catalogazione.

In alcuni casi, come per il rivestimento in sequoia, oltre alla descrizione storico-materica è stato definito anche l'aspetto grafico tramite una texture dedicata, che riproduce fedelmente il carattere delle scandole ossidate.

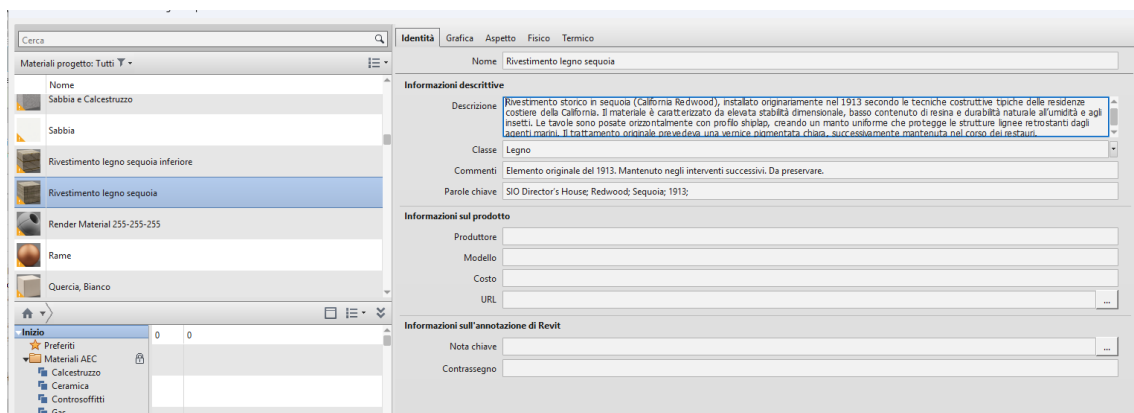


Figura 128: informazione descrittive gestione dei materiali, rivestimento in legno sequoia (fonte: screenshot Autodesk Revit 2024)

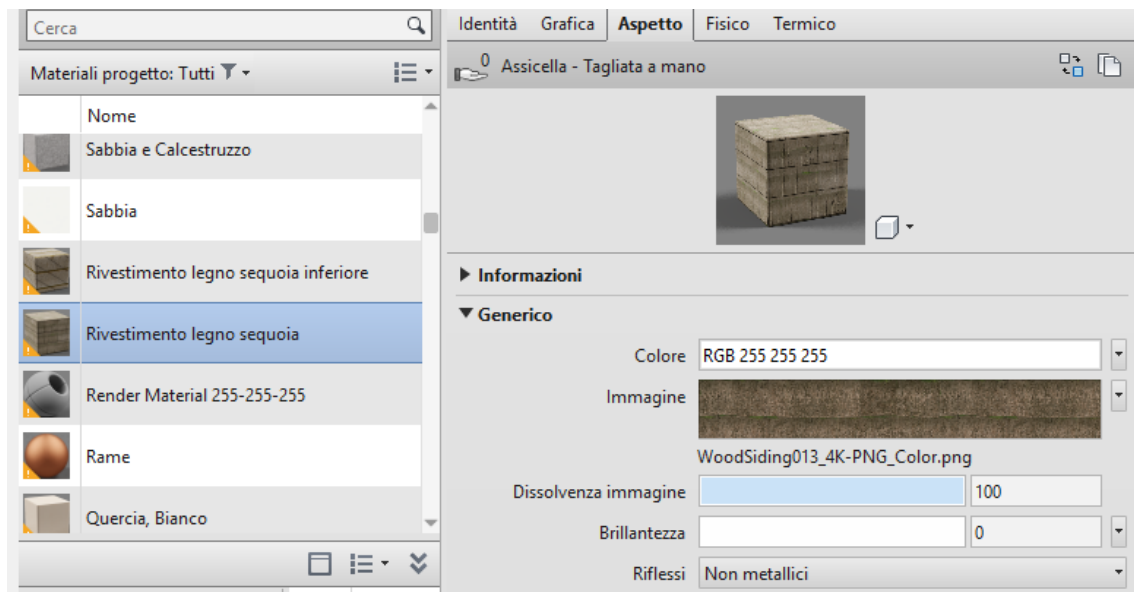


Figura 129: informazione grafiche gestione dei materiali, rivestimento in scandole di legno sequoia (fonte: screenshot Autodesk Revit 2024)

Il lavoro è proseguito con la definizione di ulteriori materiali lignei interni, come la boiserie in legno, le porte interne e l'intonaco interno applicato sui muri.

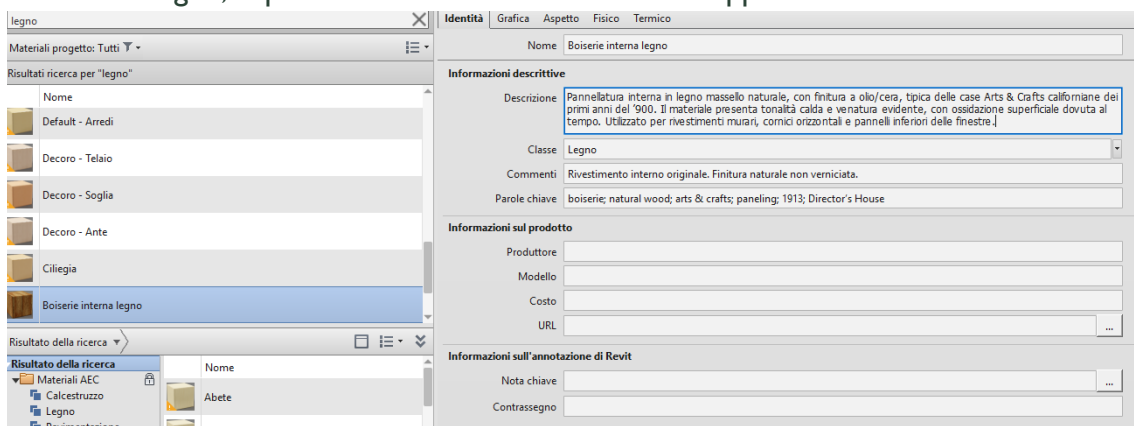


Figura 130: informazione descrittive gestione dei materiali, boiserie interna in legno (fonte: screenshot Autodesk Revit 2024)

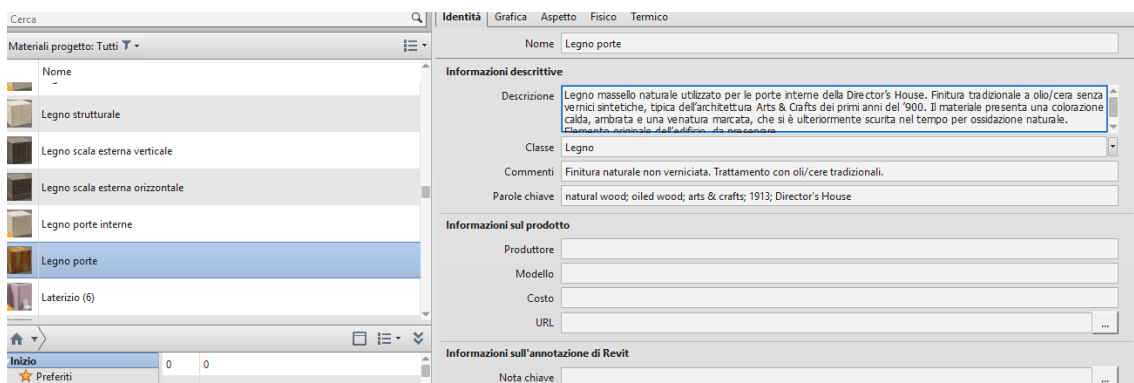


Figura 131: informazione descrittive gestione dei materiali, legno porte (fonte: screenshot Autodesk Revit 2024)

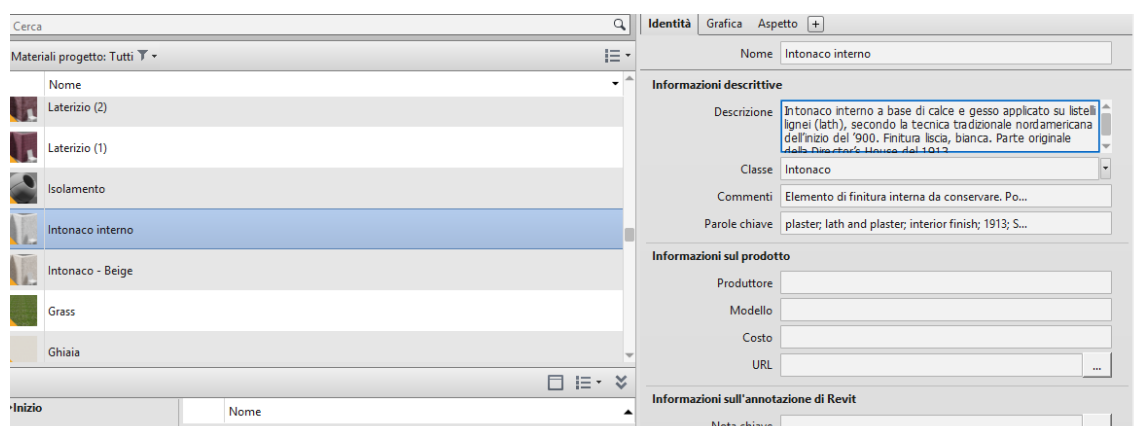


Figura 132: informazione descrittive gestione dei materiali, intonaco interno (fonte: screenshot Autodesk Revit 2024)

Per i serramenti è stato definito un materiale specifico per il legno verniciato, corredato da note sulla vernice originale.

Infine è stato modellato il pavimento storico in quercia, corredato da una scheda identitaria che documenta non solo il materiale, ma anche la posa, la venatura e le tracce di usura rilevate durante l'indagine.

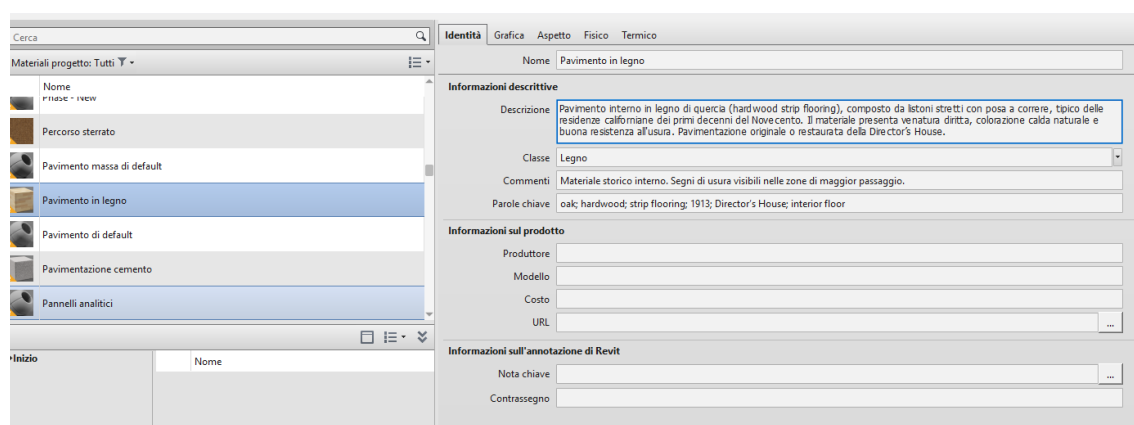


Figura 133: informazione descrittive gestione dei materiali, pavimento in legno (fonte: screenshot Autodesk Revit 2024)

Parallelamente è stata costruita una struttura informativa generale dell'edificio attraverso i parametri globali, ovvero un insieme di campi testuali che raccolgono informazioni fondamentali sulla storia e sulle caratteristiche costruttive della struttura.

Questa tabella funziona come una vera e propria anagrafica digitale dell'edificio: include l'anno di costruzione, il proprietario, il sistema di riferimento GNSS adottato, le tecniche di rilievo integrate (laser scanner, mobile mapping, fotogrammetria, GNSS), la tipologia strutturale, le caratteristiche del rivestimento esterno e le trasformazioni documentate nel tempo.

L'inserimento dei parametri globali consente di legare il modello HBIM all'intero workflow geomatico, rendendolo un archivio coerente e tracciabile.

Parametri di ricerca	
Parametro	Valore
Testo	
Anno di costruzione	1913
Proprietario edificio	University of California San Diego – SIO (Scripps Institution of Oceanography)
Sistema di riferimento GNSS	WGS84 – UTM Zone 11N
Fonte rilievo	Laser scanner Leica RTC360 + fotogrammetria (LooqAI + Metashape) + GNSS (Emlid Reach RS2)
Stato di conservazione	Buono
Note storiche generali	Edificio costruito nel 1913 come parte del complesso originario della Scripps Institution of Oceanography. Esempio significativo dello stile sulla costa californiana. Rilievo
Tipologia costruttiva	Struttura lignea balloon frame con rivestimento esterno in shingles e pannellatura interna in legno massello. Sistema costruttivo tipico delle residenze californiane del
Rivestimento esterno	Rivestimento in scandole di sequoia (redwood shingles), con ossidazione naturale dovuta all'esposizione marina. Elemento originale dell'edificio, conservato nel temp
Copertura	Copertura originaria presumibilmente in scandole di redwood. Sostituita tra gli anni '70 e '90 con guaina bituminosa ardesiata (roll roofing), per motivi di impermeabili

Figura 134: parametri globali (fonte: screenshot Autodesk Revit 2024)

Per migliorare ulteriormente la lettura conservativa del modello sono stati creati parametri di progetto, come “Originale/restaurato”, applicati come parametri di istanza alle categorie di elementi più significative.

Questo strumento permette di distinguere in modo puntuale gli elementi originari del 1913 da quelli modificati o sostituiti nel corso degli anni e risulta particolarmente utile per analisi comparative, filtri grafici e restituzioni tematiche.

Figura 135: parametri di progetto (fonte: screenshot Autodesk Revit 2024)

Un ulteriore livello informativo deriva dall'associazione sistematica delle immagini del rilievo fotogrammetrico alle istanze del modello. Ogni finestra, infisso o elemento specifico è stato collegato a una fotografia tramite il parametro immagine, diventando così immediatamente consultabile da chi esplora il modello. Questa scelta è particolarmente utile per documentare difetti, tracce di degrado o caratteristiche originali difficilmente descrivibili con il solo testo.

L'immagine si affianca inoltre ai parametri "Materiali e finiture" e "Commento", permettendo di integrare nella scheda proprietà l'aspetto reale, la composizione materica e le informazioni ricavate dalla ricerca archivistica.

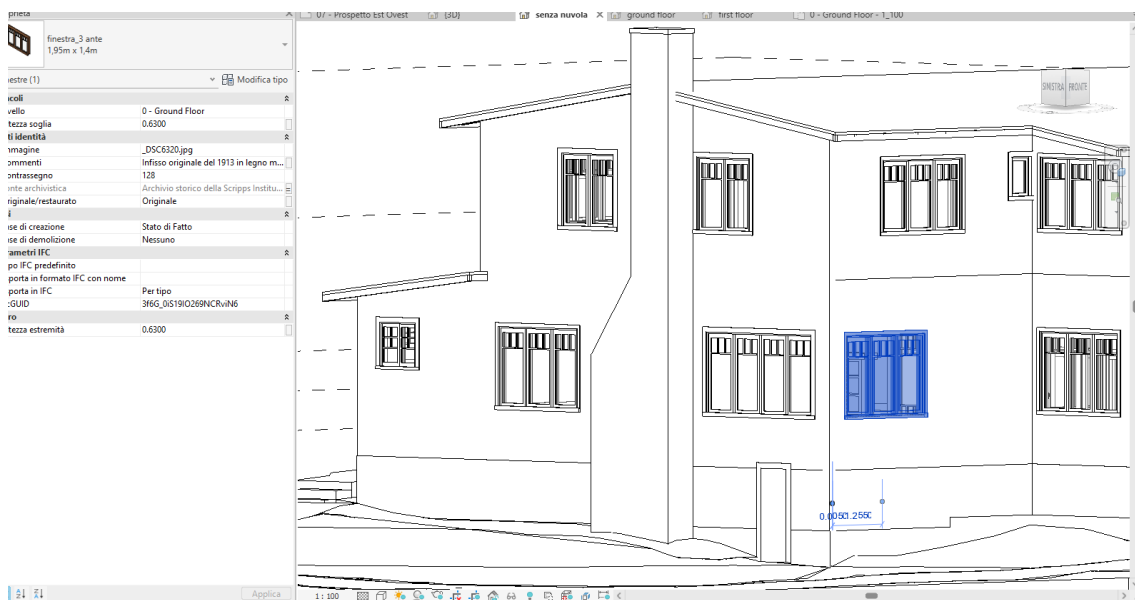


Figura 136: parametri di progetto, finestra (fonte: screenshot Autodesk Revit 2024)

Tutte le immagini utilizzate sono gestite attraverso la finestra Gestisci immagini, che funge da archivio interno del modello e permette di aggiornare, sostituire o ricollegare rapidamente ogni fotografia del rilievo.

Grazie a questi collegamenti, ogni elemento modellato diventa interrogabile a più livelli: dimensioni, materiali, documentazione fotografica, fasi storiche e stato di conservazione. Il modello non è solo rappresentativo, ma anche interpretativo e gestionale, utile per programmare interventi futuri, confrontare materiali e annotare variazioni nel tempo.

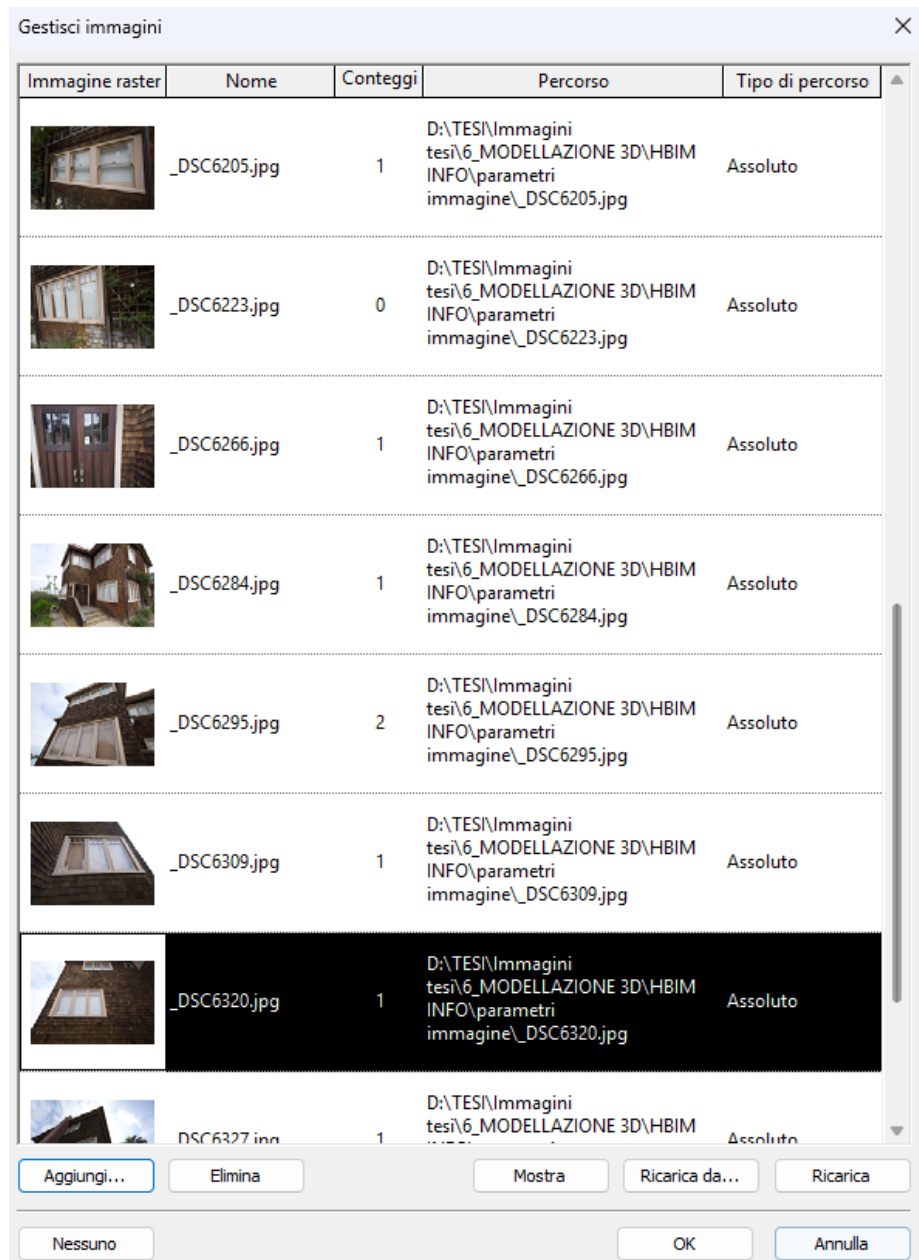


Figura 137: parametro immagine (fonte: screenshot Autodesk Revit 2024)

6.3 Verifica accuratezza del modello HBIM

Per la fase conclusiva del lavoro è stato impiegato il plugin As-Built for Revit sviluppato da FARO, utile a verificare la coerenza geometrica tra il modello HBIM e la realtà rilevata. Tale operazione ha permesso di valutare le deviazioni metriche tra la nuvola di punti acquisita in sito e la modellazione realizzata in ambiente Revit, garantendo così la conformità del modello rispetto al livello di accuratezza richiesto (LOA: Level of Accuracy).

L'analisi è stata condotta mediante il comando "Calcola" presente nella sezione As-Built Analisi del plugin, che consente di generare una mappa cromatica di scostamento capace di evidenziare, in modo intuitivo, le differenze tra il modello 3D e le superfici reali.

L'elaborazione è stata eseguita per singolo prospetto, selezionando il tetto e le superfici murarie tralasciando gli infissi, poiché questi ultimi, in fase di calcolo, generavano instabilità dovute alle limitazioni della versione demo del software.

Prima di avviare l'analisi, sono stati impostati due parametri fondamentali:

- griglia di campionamento di 50 mm, che rappresenta un compromesso efficace tra densità dei punti e tempi di elaborazione;
- distanza massima dalla superficie pari a 100 mm, utile a individuare scostamenti significativi senza introdurre rumori eccessivi nei dati.

Valori di griglia più fitti avrebbero incrementato la precisione, ma a discapito dell'efficienza di calcolo, considerata la complessità del modello e la dimensione della nuvola.

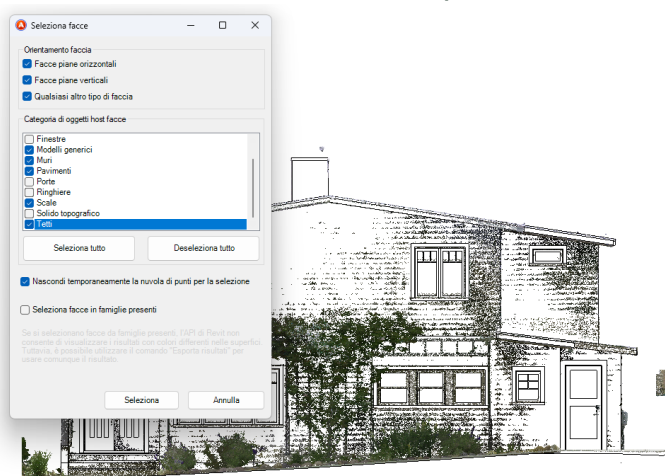


Figura 138: selezione facce per analisi deviazione - plugin as-built analisi
(fonte: screenshot Autodesk Revit 2024)

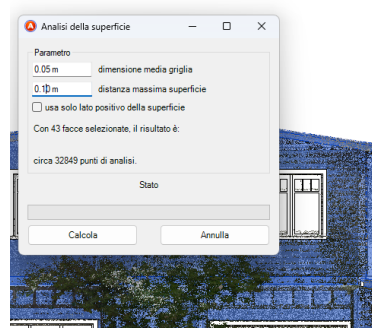


Figura 139: parametri per analisi deviazione - plugin as-built analisi
(fonte: screenshot Autodesk Revit 2024)

L'interpretazione dei risultati avviene tramite una scala cromatica che consente di classificare le deviazioni secondo intervalli di accuratezza:

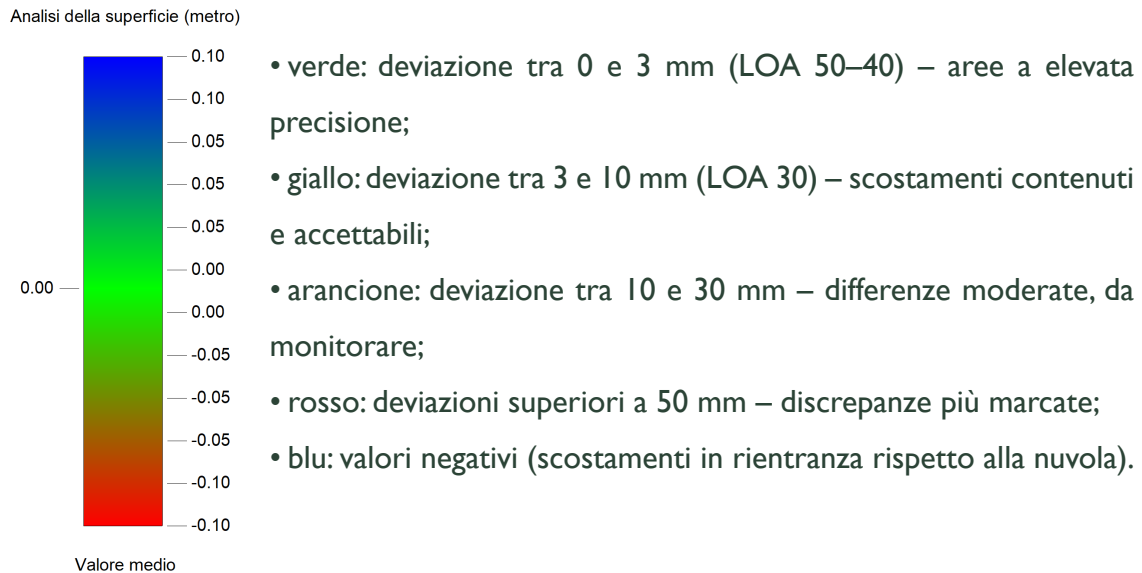


Figura 140: scala cromatica - plugin as-built analisi (fonte: screenshot Autodesk Revit 2024)

Dalle elaborazioni è emerso che i prospetti nord e sud presentano zone in rosso nella parte sommitale del tetto: queste corrispondono alle travi sottostanti la copertura, non visibili nel prospetto ma incluse nella nuvola di punti, motivo per cui il software le interpreta come sporgenze. Si è verificato tramite alcune immagini che il modello corrisponde alla realtà.

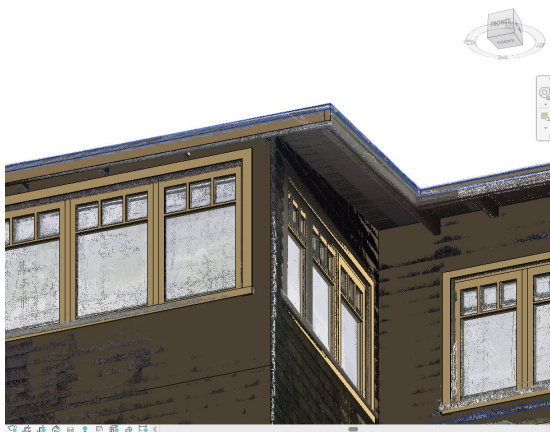


Figura 141: vista tetto e travi modello 3D
(fonte: screenshot Autodesk Revit 2024)



Figura 142: inquadramento tetto e travi
(fonte: immagine personale)

Altre deviazioni, localizzate nel prospetto est, sono dovute a elementi non modellati (come una lampada posta accanto all'ingresso) o a disturbi dovuti alla vegetazione, che hanno introdotto rumore nella nuvola.

Deviazioni in tonalità blu sono invece riscontrabili nel prospetto ovest e in parte di quello est, in corrispondenza delle porzioni aggettanti del primo piano, non completamente rilevabili durante l'acquisizione.

Infine, nella fascia basamentale, piccole anomalie cromatiche derivano dalla presenza di erba e arbusti, che interferiscono con il rilievo ma non influenzano la precisione complessiva del modello, come confermato dal confronto con le fotografie a disposizione.

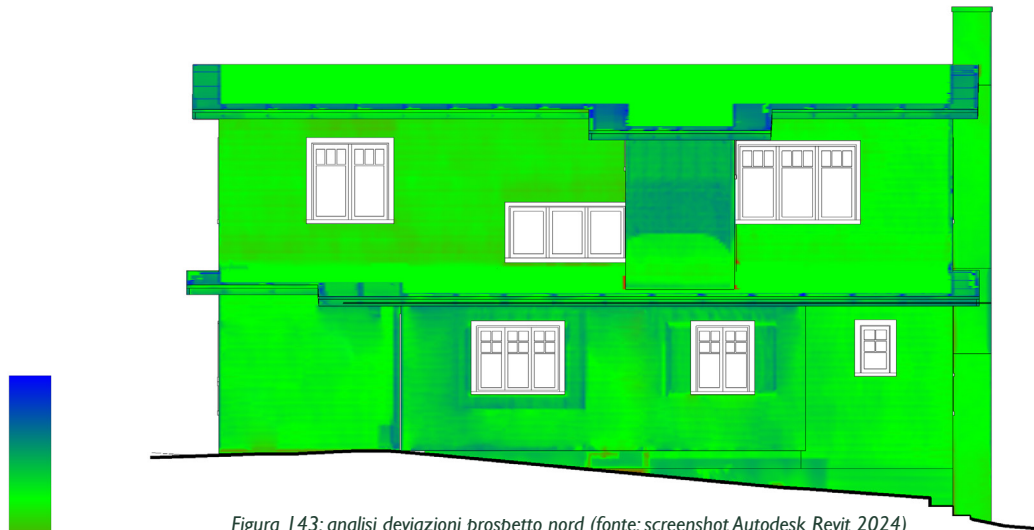


Figura 143: analisi deviazioni prospetto nord (fonte: screenshot Autodesk Revit 2024)

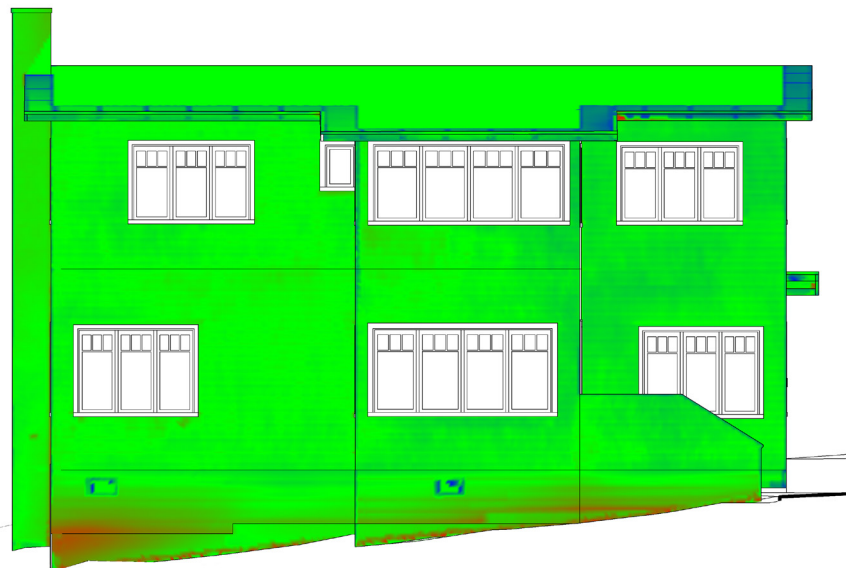


Figura 144: analisi deviazioni prospetto sud (fonte: screenshot Autodesk Revit 2024)

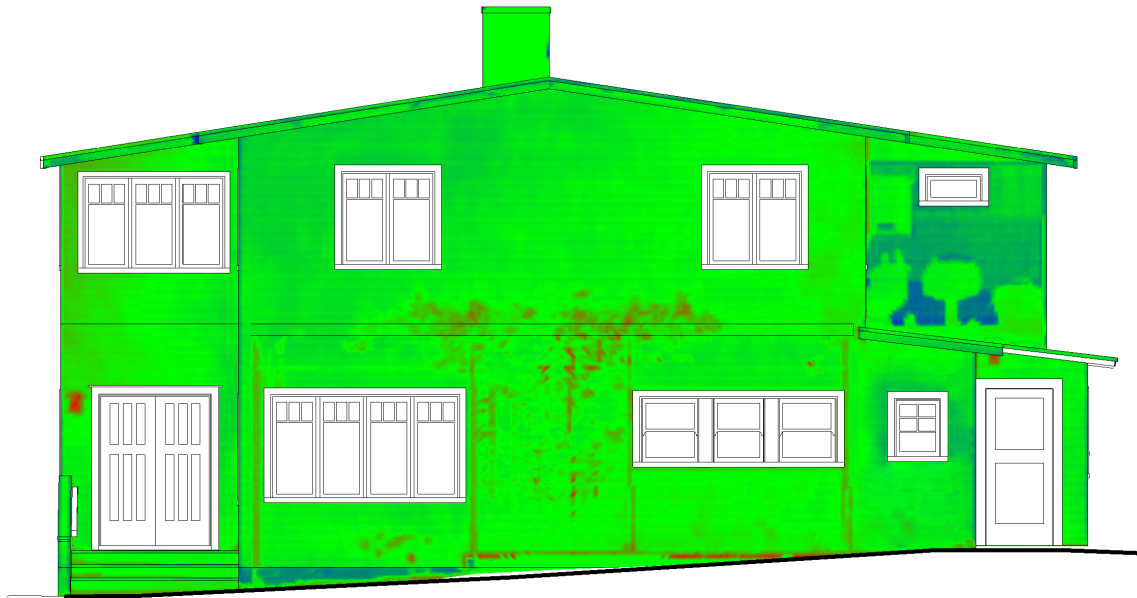


Figura 145: analisi deviazioni prospetto est (fonte: screenshot Autodesk Revit 2024)

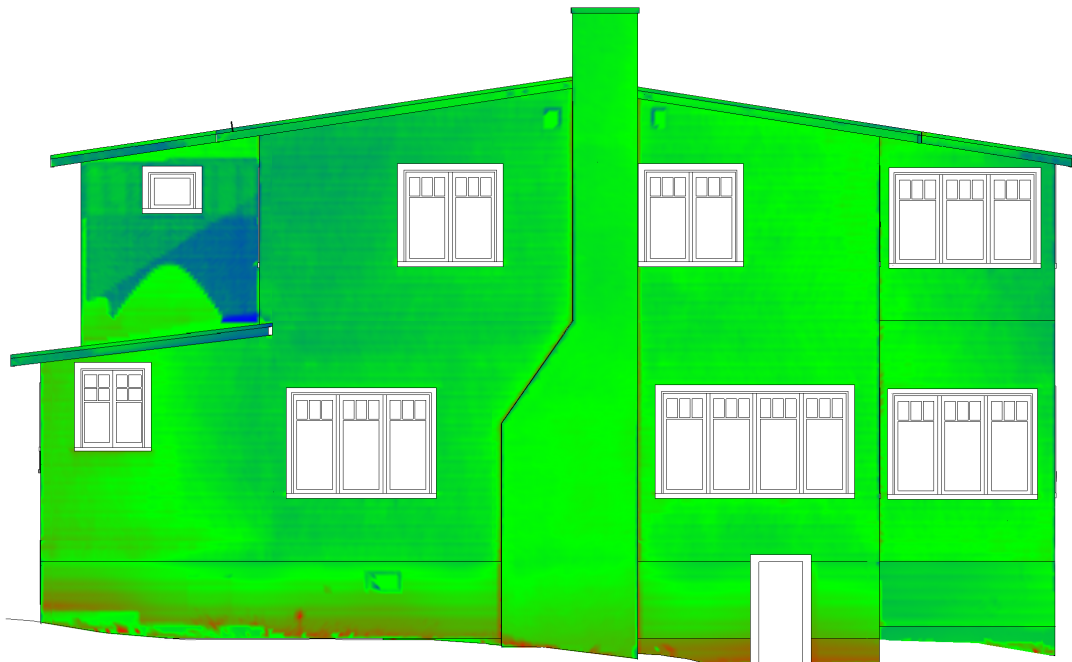


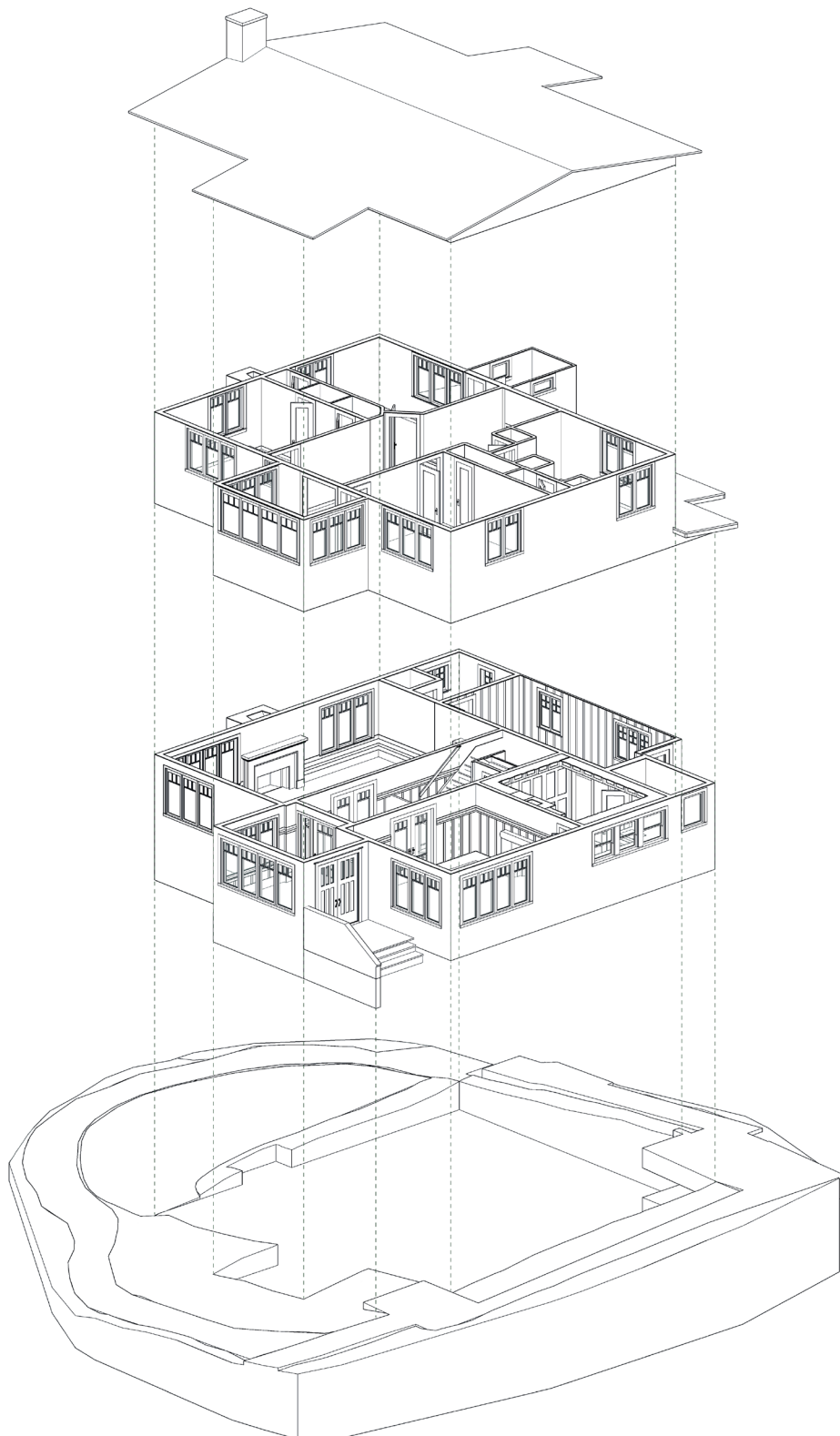
Figura 146: analisi deviazioni prospetto ovest (fonte: screenshot Autodesk Revit 2024)

Nel complesso, l'analisi dimostra che il modello HBIM della Director's House presenta elevata coerenza geometrica, con scostamenti medi inferiori a 3 mm. Tali valori rientrano pienamente nei livelli di accuratezza richiesti per il livello LOA 50 e 40. Risultano particolarmente significativi se si considera la morfologia irregolare delle superfici reali, rivestite da doghe di sequoia sovrapposte, che determinano naturalmente variazioni geometriche non riconducibili a errori di modellazione.

Il risultato conferma quindi la qualità metrica e informativa del modello HBIM, che può essere considerato una rappresentazione fedele e affidabile dello stato di fatto dell'edificio.

Elaborati grafici

Esploso assometrico



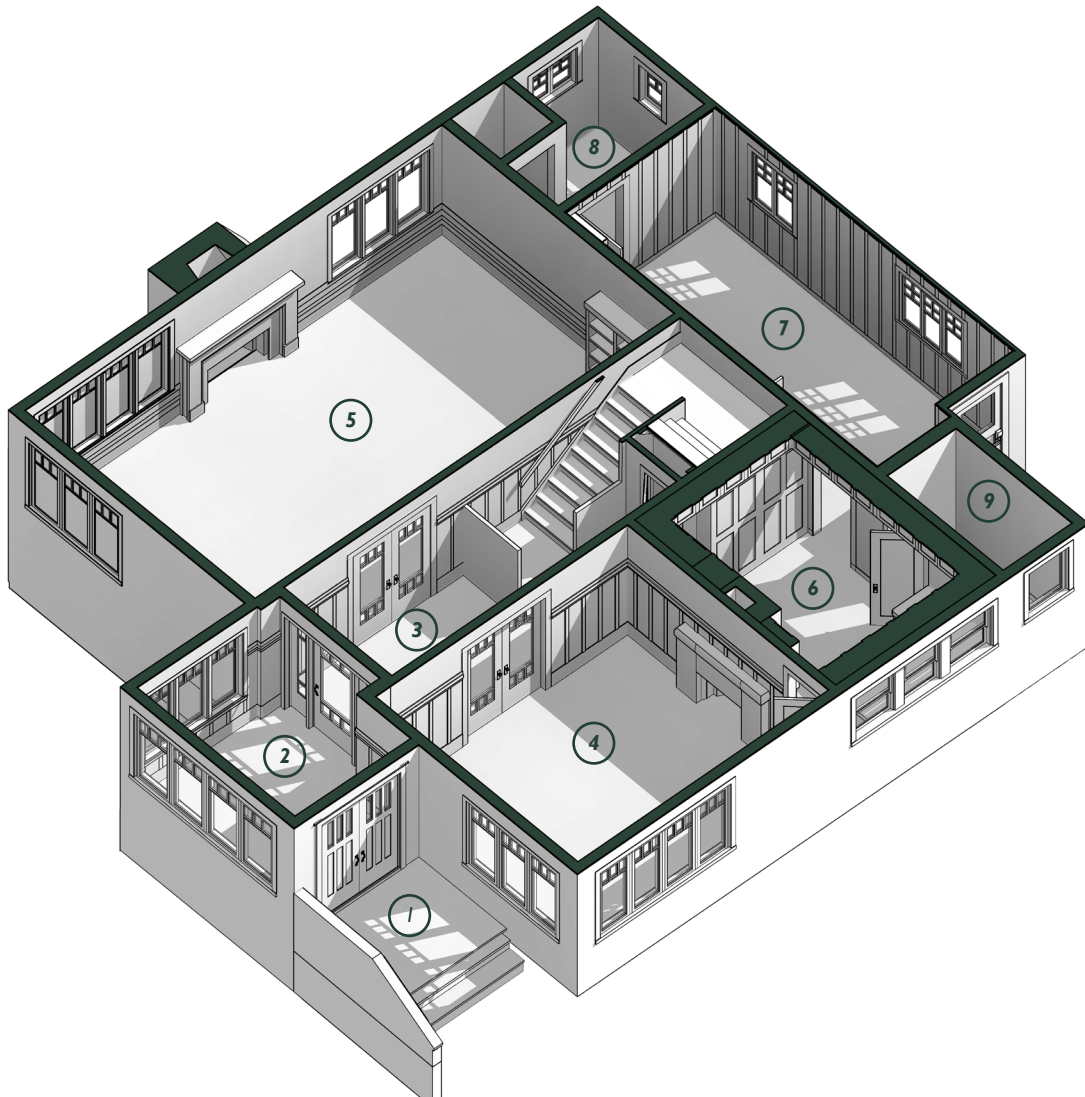
Copertura

Piano primo

Piano terreno

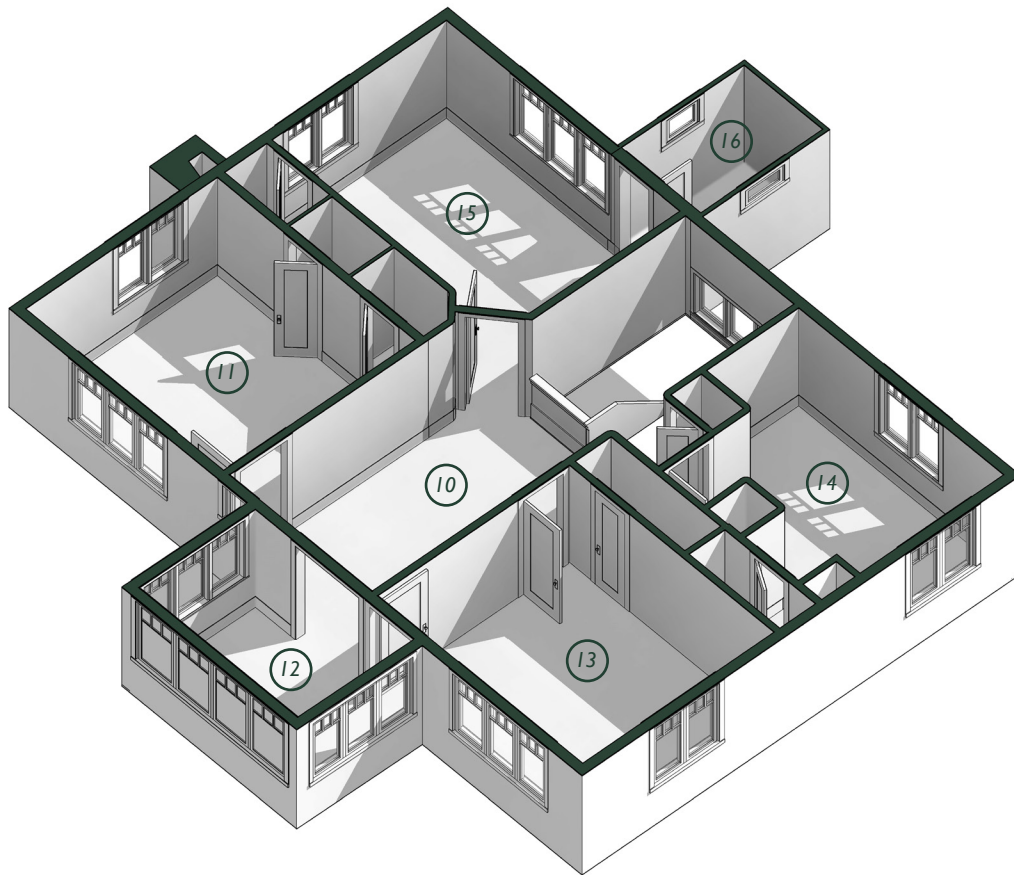
Solido topografico

Vista assonometrica piano terreno



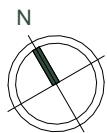
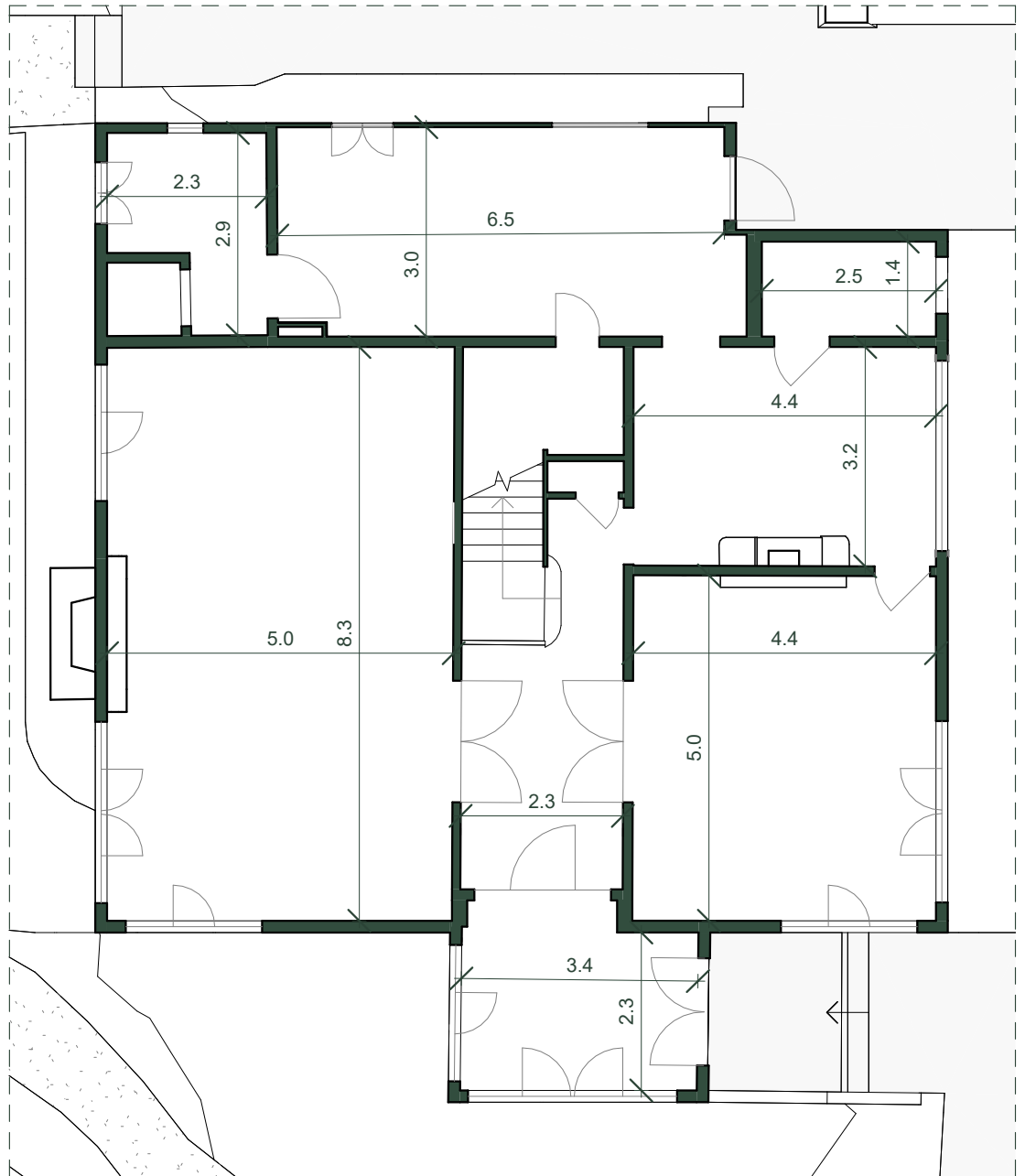
1. Scala d'accesso
2. Atrio d'ingresso
3. Corridoio con scale di collegamento al piano superiore
4. Sala da pranzo
5. Salotto
6. Cucina
7. Atrio d'ingresso secondario
8. Bagno
9. Ripostiglio

Vista assonometrica piano primo

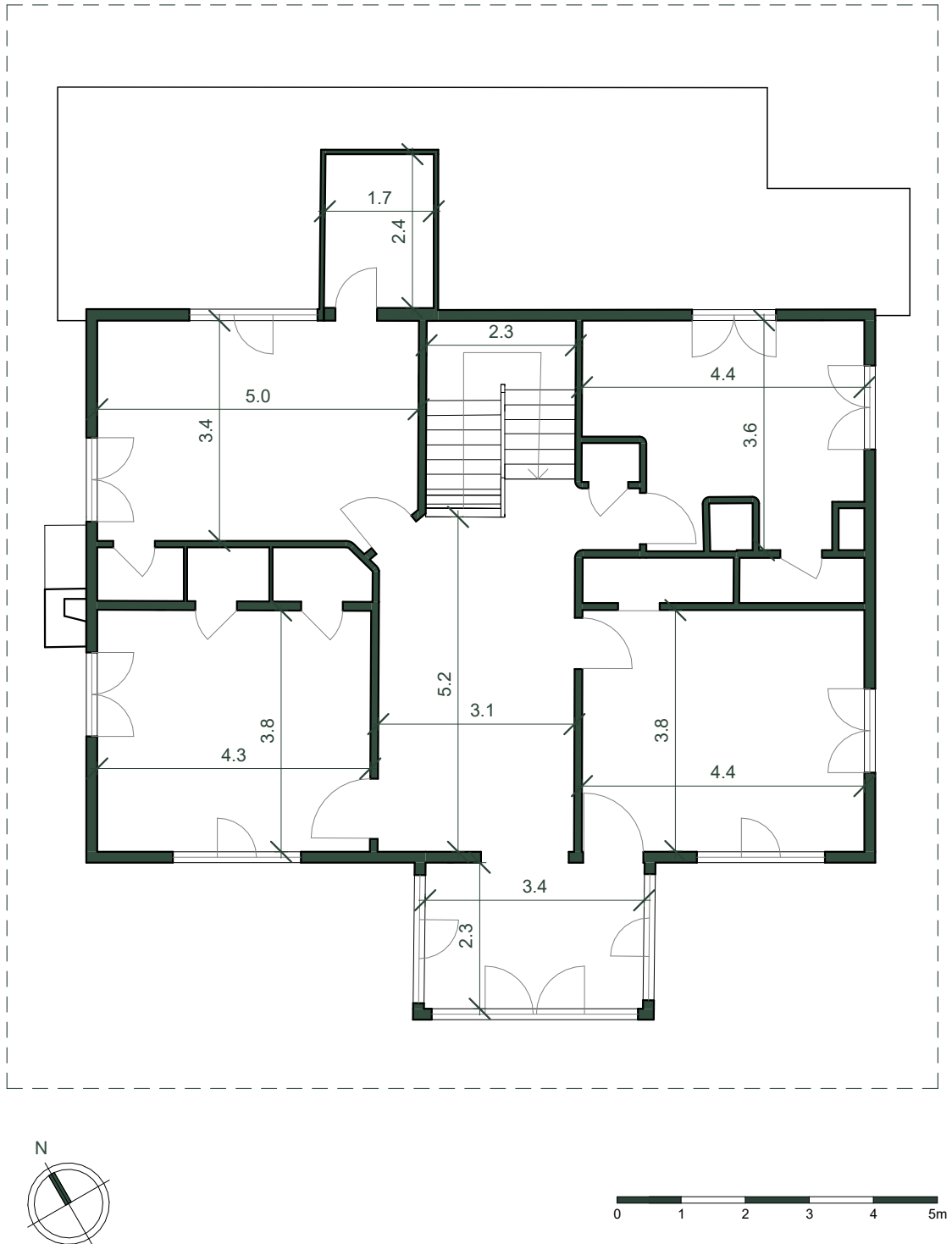


- 10. Atrio
- 11. Ufficio del Direttore
- 12. Sala interna
- 13. Ufficio
- 14. Ufficio
- 15. Ufficio
- 16. Bagno

Piano terreno



Piano primo



Prospetto Nord



Prospetto Sud



Prospetto Est



Prospetto Ovest



Conclusioni

La ricerca condotta sulla Director's House presso la University of California San Diego rappresenta non solo un esercizio tecnico e metodologico, ma un percorso formativo completo che ha unito rilievo, storia, sperimentazione digitale e modellazione informativa. L'esperienza svolta all'interno del laboratorio CHEI ha permesso di confrontarmi con un contesto di ricerca avanzato, in cui la geomatica e le tecnologie di documentazione 3D sono parte integrante dei processi di conservazione e valorizzazione del patrimonio.

Grazie a questa occasione ho potuto integrare competenze teoriche e operative, sviluppando un workflow rigoroso e replicabile per la documentazione e conservazione di manufatti appartenenti al patrimonio.

Alla base del lavoro vi è un rilievo metrico tridimensionale articolato e interdisciplinare, fondato sull'integrazione di tecniche range-based e image-based: laser scanner terrestre Leica RTC360, fotogrammetria a immagine ad alta risoluzione e mobile mapping LooqAI, tutti georeferenziati tramite una rete di punti GNSS costruita secondo le linee guida ASPRS.

La combinazione di questi dataset ha prodotto una nuvola di punti completa, accurata e idonea alle successive fasi di modellazione. Il confronto tra sistemi acquisitivi differenti, in particolare tra RTC360 e LooqAI, ha evidenziato punti di forza e criticità di ciascuna tecnica: da un lato la precisione geometrica millimetrica, dall'altro la ricchezza cromatica, ma anche il maggiore rumore e la minore omogeneità del dato, come confermato dall'analisi eseguita in CloudCompare.

Su questa base è stato costruito il modello HBIM, concepito non come semplice ricostruzione geometrica, ma come un vero sistema informativo aperto, capace di collegare geometria, materiali, storia costruttiva. La modellazione in Revit ha richiesto un processo accurato di interpretazione critica della nuvola di punti, della morfologia delle superfici in scandole di sequoia e delle irregolarità proprie di un edificio in legno del 1913.

La modellazione HBIM ha previsto anche la definizione di famiglie parametriche personalizzate per un ampio numero di componenti dell'edificio, così da restituire geometrie irregolari, elementi decorativi e dettagli costruttivi non contemplati dalle librerie native di Revit e garantire un modello coerente con il dato metrico della nuvola di punti.

Le verifiche metriche hanno dimostrato un'elevata coerenza tra modello e realtà, con scostamenti medi inferiori a 3 mm e quindi pienamente compatibili con i livelli LOA 40 e LOA 50. Tale risultato conferma l'affidabilità dell'approccio integrato seguito lungo l'intero workflow.

Parallelamente, il modello è stato arricchito con schede materiali, parametri di progetto, parametri globali e immagini di rilievo, trasformandosi in un archivio strutturato che conserva non solo dati geometrici, ma anche informazioni interpretative e documentali sulla Director's House.

L'intero processo, dalla raccolta sul campo alla modellazione finale, conferma come l'integrazione tra geomatica e HBIM rappresenti oggi uno strumento essenziale per la conservazione del patrimonio architettonico recente. Se da un lato il lavoro ha prodotto un contributo metodologico, un workflow solido, trasferibile e basato sull'integrazione dei dati, dall'altro ha confermato il valore dell'HBIM come strumento di conoscenza, conservazione e comunicazione, capace di restituire non solo la forma dell'edificio, ma la sua storia, le sue trasformazioni e il suo ruolo nel contesto culturale della Scripps Institution of Oceanography.

Bibliografia

Fonti primarie d'archivio (Scripps Institution of Oceanography Archives, UC San Diego Library)

Borsa, N. a Day, D. (1993). Procedura per la Designazione Storica della T-16 (lettera), 22 gennaio 1993, T-16 Director's House, SIO Archives, UC San Diego Library, Geisel Library, La Jolla, CA.

Comitato per il Patrimonio dello Scripps (Heritage Committee), Bozza di promemoria al Marine Sciences Physical Planning Committee (MSPPC), 16 aprile 1993, T-16 Director's House, SIO Archives, UC San Diego Library, Geisel Library, La Jolla, CA.

Shor, B. (1993). Storia della Casa del Direttore (T-16), (lettera), febbraio 1993, T-16 Director's House, SIO Archives, UC San Diego Library, Geisel Library, La Jolla, CA.

Shor, B. a Hessler, R. (1989). T-16 come edificio storico (lettera), 21 novembre 1989, Heritage Committee records, SIO Archives, UC San Diego Library, Geisel Library, La Jolla, CA.

SIO Facilities, Residential Review, Rilievi quotati delle residenze SIO, 1937, disegni tecnici, SIO Archives, UC San Diego Library, Geisel Library, La Jolla, CA.

T-16 Director's House, occupants, 1913–2017, (schedari interni), T-16 Director's House file, SIO Archives, UC San Diego Library, Geisel Library, La Jolla, CA.

Periodici

Explorations. Scripps Institution of Oceanography (2003). *Scripps Centennial Issue. Celebrating 100 Years of Exploration and Discovery*, Vol. 10, n. 1 (Summer 2003). University of California, San Diego.

Bibliografia scientifica

Abate, D., Toschi, I., Sturdy-Colls, C., & Remondino, F. (2017). *Structure-from-Motion photogrammetry for heritage documentation*.

AEC (UK) Committee. (2015). AEC (UK) *BIM Protocol for Autodesk Revit* (Version 2.0).
AEC (UK) Committee. (2015). AEC (UK) *BIM Technology Protocol* (Version 2.1.1).

Agisoft. (2024). *Agisoft Metashape User Manual: Professional Edition*, Version 2.1. Disponibile su: https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_2_1_it.pdf.

Almagro, A. (n.d.). *Photogrammetry for Everybody*. International CIPA Symposium, Olinda, Brasile-

ASPRS – American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (2023). *Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data*, Edition 2, Version 1.0. <https://www.asprs.org/standards>.

Banfi, F. (2017). A new level of detail for HBIM: From BIM to H-BIM. *ISPRS Archives*, XLII-2/W5, 55–62.

Bianchi, G., Bruno, N., Dall'Asta, E., Forlani, G., Re, C., Roncella, R., Santise, M., Vernizzi, C. & Zerbi, A. (2016). *Integrated Survey for Architectural Restoration: A Methodological Comparison of Two Case Studies*. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI(B5), 175–182. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B5-175-2016>.

BIMForum. (2019). *Level of Development (LOD) Specification*, 2019 Edition.

Borriello, C., Stano, R., Spanò, N., Chiabrando, F., & Lingua, A. (2019). *Applicazioni innovative di metodi di rilievo 3D ed esiti della modellazione. Esperienze didattiche e approfondimenti sui temi dell'HBIM e della realtà virtuale. Atti e Rassegna Tecnica della Società degli Ingegneri e degli Architetti in Torino*, 73(3), 230–234

Chiabrando, F., Donadio, E. & Rinaudo, F. (2015). *SfM for Orthophoto Generation: A Winning*

Approach for Cultural Heritage Knowledge. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XL-5/W7, 91–98. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W7-91-2015>

Chiabrando, F., Teppati Losè, L. & Patrucco, G. (2021). *Documentation of a Complex Cultural Heritage Asset with Integrated Geomatic Survey: The Montanaro Bell Tower. Proceedings of the 9th Arqueológica 2.0 & 3rd GeoRes Conference, Valencia, 176–184. Editorial Universitat Politècnica de València*. <https://doi.org/10.4995/Arqueologica9.2021.12107>

Chiabrando, F., Coletta, C.D., Sammartano, G., Spanò, A., & Spreafico, A. (2018). “Torino 1911” project: a contribution of a slam-based survey to extensive 3d heritage modeling. *Isprs - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 422, 225-234

City of San Diego – Historical Resources Board. *Programmi di tutela e designazioni storiche*. <https://www.sandiego.gov/planning/programs/historical>

CloudCompare. n.d. *CloudCompare v2.6.1 - User Manual*. <https://www.cloudcompare.org/doc/qCC/CloudCompare%20v2.6.1%20-%20User%20manual.pdf>

Colomina, I. & Molina, P. (2014). *Unmanned Aerial Systems for Photogrammetry and Remote Sensing: A Review. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 92, 79–97. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013>

Conti, A., Pagliaricci, G., Bonora, V., and Tucci, G.: A COMPARISON BETWEEN TERRESTRIAL LASER SCANNING AND HAND-HELD MOBILE MAPPING FOR THE DOCUMENTATION OF BUILT HERITAGE, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLVIII-2/W4-2024, 141–147, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-W4-2024-141-2024>, 2024

Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2018). *BIM Handbook* (3rd ed.). Wiley

Eltner, A. & Sofia, G. (2020). *Structure-from-Motion Photogrammetric Technique*. In: M. Mudd & P. Tarolli (a cura di) *Developments in Earth Surface Processes*, 23, 1–24. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64177-9.00001-1>

- Emlid (2023). *Reach RS2 Datasheet*. <https://emlid.com/reachrs2/>
- Erturan, A. M. ., Durdu, A. ., & Erturan, E. M. . (2019). *The Use of LIDAR Technology in Architectural Offices*. *European Journal of Engineering Science and Technology*, 2(2), 40–48. <https://doi.org/10.33422/EJEST.2019.07.09>
- Furby, B., & Akhavian, R. (2024). *A Comprehensive Comparison of Photogrammetric and RTK-GPS Methods for General Order Land Surveying*. *Buildings*, 14(6), 1863. <https://doi.org/10.3390/buildings14061863>
- Garagnani, S. (2016). BIM, HBIM e GIS per la gestione del patrimonio. *DisegnareCon*, 9(17), 12–25.
- Garzino, G., & Lo Turco, M. (s.d.). *Dal disegno digitale alla progettazione parametrica*.
- Geo Week News (2024). *Looq AI emerges from stealth with release of the Looq platform*. <https://www.geoweeeknews.com/news/loooq-ai-digital-twin-data-capture-artificial-intelligence-imagery>
- Hashmi, H. H., & Lopez Ortiz, M. J. (2021). *Gardella's Lost Legacy: The Church of Alessandria. Study, 3D Documentation and Analysis*. Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino.
- Kraus, K. (2007). *Photogrammetry: Geometry from images and laser scans* (2nd ed.). Berlin: Walter de Gruyter. <https://doi.org/10.1515/9783110892871>
- Leica Geosystems (2018). *Leica RTC360 – Scheda tecnica ufficiale*. <https://leica-geosystems.com/it-it/products/laser-scanners/scanners/leica-rtc360>
- Leica Geosystems AG. (2018). *Leica RTC360 – User Manual, Version 1.0.1*. Heerbrugg, Switzerland: Leica Geosystems AG. https://www.geooptic.ru/static/files/870891_Leica_RTC360_UM_v1.0.1_en.pdf
- Li, Y., Zhao, L., Chen, Y., Zhang, N., Fan, H. & Zhang, Z. (2023). *3D LiDAR and Multi-Technology Collaboration for Preservation of Built Heritage in China: A Review*. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 116. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.103156>

Logothetis, S., Delinasiou, A., & Stylianidis, E. (2015). Building Information Modelling for Cultural Heritage. *ISPRS Annals*, II-5/W3, 177–183.

Looq AI Inc. (2021–). *About Looq*. <https://www.looq.ai> – Ultimo accesso: giugno 2025.

Lo Turco, M. (2022). *BIM and infographic representation in the construction process*.

Luhmann, Thomas & Robson, Stuart & Kyle, Stephen & Harley, IA. (2006). *Close Range Photogrammetry: Principles, Techniques and Applications*

Lumini, A. (2021). *L'HBIM per la fruizione virtuale interattiva del Patrimonio Architettonico*. Tesi di Dottorato, Università di Firenze

Mehendale, Ninad and Neoge, Srushti, Review on Lidar Technology (2020). <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3604309>

Menegatti Emanuele, Matteo Munaro, Stefano Michieletto, Stefano Tonello, Mauro Antonello, Daniele Alberton. (2015) *General configuration of a Laser Triangulation System*. https://www.researchgate.net/figure/General-Configuration-of-a-Laser-Triangulation-System_fig1_283108894

Murphy, M., McGovern, E., & Pavia, S. (2007; 2009). *Historic Building Information Modelling*.

Pellegrino, E. (2021). *Geomatica e HBIM per il patrimonio storico: il Campanile della Chiesa di Santa Marta di Bernardo Vittone*. Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino

Pozzoli, S., Bonazza, M., & Villa, S.W. (2021). *Revit Architecture 2021 — Guida completa*.

Remondino, F. Russo, M., Guidi G. (2011) *Principali tecniche e strumenti per il rilievo tridimensionale in ambito archeologico*. *Archeologia e calcolatori*. <https://www.archcalc.cnr.it/journal/articles/592>

Remondino, F., Nocerino, E., Toschi, I., and Menna, F.: A critical review of automated photogrammetric processing of large datasets, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W5, 591–599. <https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XLII-2-W5/591/2017/>

Rinaudo, F., Chiabrando, F., Nex, F. & Piatti, D. (2010). *New Instruments and Technologies for Cultural Heritage Survey: Full Integration between Point Clouds and Digital Photogrammetry*. In: Ioannides, M. (a cura di) *Digital Heritage*. Berlin: Springer, 56–70. https://doi.org/10.1007/978-3-642-16873-4_5

Rocca, E., McAvoy, S., & Rissolo, D. (2025). *Field Report: Director's House, Scripps Institution of Oceanography (UCSD)*. eScholarship, University of California. <https://escholarship.org/uc/item/80q150qg>

Roggero, M. (2021). *Dispense del corso "Laboratorio di Geomatica per la modellazione dell'Architettura"*, Politecnico di Torino, a.a. 2020/2021

Sammartano, G., Previtali, M., & Banfi, F. (2021). *Parametric generation in HBIM workflows for slam-based data: discussing expectations on suitability and accuracy*

Sammartano, G., Spanò, A. T., & Accornero, F. (2019). *Metodologie integrate per la documentazione e la valorizzazione del patrimonio culturale: il caso della Chiesa di Sant'Agostino a Torino. Atti e Rassegna Tecnica della Società degli Ingegneri e degli Architetti in Torino, LXXIII (3), 217–221*

Scripps Institution of Oceanography Archives – UC San Diego Library. *Portale e collezioni digitali*. https://search-library.ucsd.edu/discovery/fulldisplay?docid=alma991002884299706535&context=L&vid=01UCS_SDI:UCSD

TechInformed (2025). *A coffee with Dominique Meyer, CEO and cofounder, Looq AI*. <https://techinformed.com/a-coffee-with-dominique-meyer-ceo-and-cofounder-looq-ai>

Tucci, G., Visintini, D., Bonora, V. & Parisi, E.I. (2018). *Examination of Indoor Mobile Mapping Systems in a Diversified Architectural Environment*. *Applied Geomatics*, 10(4), 317–332. <https://doi.org/10.1007/s12518-018-0222-3>

UC San Diego – Scripps Institution of Oceanography. *Storia della Scripps*. <https://scripps.ucsd.edu/about/history>

UC San Diego. *Storia dell'università (UCSD History)*. <https://catalog.ucsd.edu/about/about-uc-san-diego/index.html>

Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., & Reynolds, J. M. (2012). *'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications*. *Geomorphology*, 300-314. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X12004217>

Zerbinatti, M. Matrone, F., Lingua, A. (2021). *Planned Maintenance for Architectural Heritage. Experiences inProgress from 3D survey to intervention programmes through HBIM*. <https://hdl.handle.net/11583/2851715>