



POLITECNICO
MILANO 1863

SCUOLA DI ARCHITETTURA URBANISTICA
INGEGNERIA DELLE COSTRUZIONI

Ottimizzazione di spazi a uso ufficio in un immobile esistente attraverso l'integrazione BIM-IoT

Dall'acquisizione della nuvola di punti allo sviluppo di modelli BIM
per l'integrazione con sensori IoT: implementazione del Digital Twin

TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN
BUILDING ENGINEERING
INGEGNERIA DEI SISTEMI EDILIZI

Author: **Andrea Vittoria Semeraro**

Student ID: 971228

Advisor: Fulvio Re Cecconi

Co-advisor: Sebastiano Maltese

Academic Year: 2023/2024

A te che hai sempre fatto il tifo per me, spero di
averti reso orgogliosa e di essere anche solo
lontanamente la donna che sei stata.

Te echo de menos, mamá

A te che sempre ci sei stato e sempre ci sarai, a
te che non desideri altro che la mia felicità, non
potevo desiderare complice migliore

Non ce l'avrei fatta senza di te, papà

Abstract

Con l'avvento di nuove tecnologie costruttive ed elevati standard di progettazione, la fase di gestione e manutenzione del costruito sta assumendo maggiore centralità nel controllo dei consumi e nell'ottimizzazione dell'opera realizzata. La tesi si inserisce nel contesto di un progetto di ricerca il cui obiettivo è sviluppare un sistema in grado di ottimizzare la gestione di edifici esistenti a uso uffici attraverso i dati raccolti da sensori di temperatura, umidità e CO₂, installati negli ambienti; gestendo poi il collegamento di questi con il modello 3D e impostando algoritmi di previsione, l'intenzione è quello di ottenere il Digital Twin degli immobili interessati, al fine di fornire una visualizzazione chiara e facilmente consultabile dei dati raccolti e dell'andamento degli stessi in relazione all'utilizzo degli spazi. La tesi si focalizza sulla prima parte del processo: partendo da nuvole di punti adeguatamente ripulite, l'obiettivo è provare a automatizzare la modellazione degli elementi architettonici essenziali e collegare il modello così ottenuto ai sensori installati. Dopo aver riportato lo stato dell'arte in materia di Digital Twin, Scan-to-BIM e sensoristica IoT, l'elaborato presenta la metodologia sviluppata e gli strumenti individuati per raggiungere l'obiettivo, evidenziando le caratteristiche fondamentali di ciascuno step, al fine di rendere il progetto replicabile a prescindere dalle condizioni di partenza o dai software e dagli strumenti utilizzati. Il caso studio presentato, relativo a un piano del campus SUPSI a Mendrisio, applica la metodologia descritta, concentrandosi sugli step di acquisizione dei dati dello stato di fatto e di modellazione e confrontando i risultati ottenuti attraverso diversi applicativi. La tesi non farà riferimento alla parte di predizione basata sui dati, né all'effettiva estrazione e filtratura dei dati dai sensori, concentrandosi più sull'aspetto BIM del processo.

Abstract

With the advent of new construction technologies and high design standards, the management and maintenance phase of the built environment is becoming more central in the control of consumption and in the optimization of the built environment. The thesis is part of a research project whose objective is to develop a system capable of optimizing the management of existing office buildings through the data collected by temperature, humidity and CO2 sensors, installed in the rooms; then managing the connection of these with the 3D model and setting prediction algorithms, the intention is to obtain the Digital Twin of the properties concerned, in order to provide a clear and easily consultable visualization of the data collected and the trend of the same in relation to the use of the spaces. The thesis focuses on the first part of the process: starting from properly cleaned point clouds, the goal is to automate the modelling of the essential architectural elements and connect the model thus obtained to the installed sensors. After reporting the state of the art in the field of Digital Twins, Scan-to-BIM and IoT sensors, the paper presents the methodology developed and the tools identified to achieve the goal, highlighting the fundamental characteristics of each step, in order to make the project replicable regardless of the starting conditions or the software and tools used. The case study presented, relating to a plan of the SUPSI campus in Mendrisio, applies the methodology described, focusing on the steps of data acquisition of the As-Is state and modelling and comparing the results obtained through different applications. The thesis will not refer to the data-driven prediction part, nor to the actual extraction and filtering of data from sensors, focusing more on the BIM aspect.

Indice

Abstract.....	i
1 Introduzione	1
2 Dal rilevamento dello stato di fatto al Digital Twin Predittivo.....	3
2.1. Obiettivi del processo.....	5
2.2. Analisi del processo.....	6
2.3. Criticità e punti focali del processo	9
3 Point Cloud e Scan-to-BIM	11
3.1. Scan-to-BIM: stato dell'arte.....	12
3.2. Acquisizione di nuvole di punti	17
3.3. Applicazione dello Scan-to-BIM	18
4 Modello BIM	20
4.1. Stato dell'arte	20
4.1.1. Il BIM e la sua evoluzione.....	20
4.1.2. BIM e automazione	26
4.2. LOD, LOG e LOI.....	29
4.3. Requisiti del modello.....	34
5 Sensori IoT	40
5.1. Stato dell'arte	40
5.2. Sensori IoT e Case Study	46
6 Digital Twin	49
6.1. Stato dell'arte	49
6.2. Tipologie di Digital Twin	52
6.3. Piattaforme per il Digital Twin.....	54

7	Case study.....	58
7.1.	Presentazione	58
7.2.	Acquisizione della nuvola di punti.....	62
7.2.1.	Acquisizione da mobile device.....	62
7.2.2.	Acquisizione con laser scanner statico BLK360G2.....	69
7.2.3.	Acquisizione con laser mobile BLK2Go	82
7.3.	Modellazione.....	87
7.4.	Confronto dei risultati	99
7.5.	Considerazioni	104
8	Conclusioni	107
	Riferimenti	I
	Ringraziamenti	

1 Introduzione

Il panorama dell'industria delle costruzioni sta vivendo una trasformazione senza precedenti, alimentata dai rapidi progressi nelle tecnologie costruttive e dall'adozione di standard più elevati nel design e nella sostenibilità. Questa evoluzione non ha solo cambiato il modo in cui gli edifici sono concepiti e costruiti, ma ha anche avuto un impatto significativo sulla loro fase operativa, in particolare nel contesto del controllo dei consumi e dell'ottimizzazione delle risorse.

In questo contesto, il presente elaborato si colloca all'interno di un ambizioso progetto di ricerca volto a sfruttare il potenziale del Building Information Modeling (BIM) integrato con l'Internet of Things (IoT) per migliorare la gestione degli immobili per uffici esistenti.

Questa ricerca si propone di raggiungere lo scopo attraverso l'analisi approfondita dei dati raccolti da sensori ambientali (temperatura, umidità e livelli di CO₂). Integrando questi dati con un modello 3D dinamico dell'edificio, il progetto mira a stabilire un Digital Twin predittivo - una replica virtuale che non solo riflette lo stato fisico dell'edificio ma fornisce anche informazioni consultabili basate sull'analisi dei dati raccolti. Il Digital Twin serve come strumento fondamentale per il facility management, consentendo loro di prendere decisioni informate sull'utilizzo dello spazio, il consumo energetico e le prestazioni generali dell'edificio.

Focus principale di questa tesi è il meticoloso processo che collega la fase iniziale di raccolta dati - comprendente l'acquisizione e la pulizia di nuvole di punti - alla modellazione sofisticata degli elementi architettonici essenziali, collegando successivamente questi modelli ai sensori IoT installati. Attraverso un'esplorazione dettagliata dello stato dell'arte della tecnologia Digital Twin, dei processi di Scan-to-BIM e della distribuzione dei sensori IoT, la tesi presenta un quadro metodologico progettato per raggiungere l'integrazione di questi sistemi autonomi ma interconnessi. Evidenziando le caratteristiche fondamentali di ciascuna fase procedurale, la tesi mira a fornire un modello replicabile che può essere adattato a una varietà di tipologie edilizie e condizioni, indipendentemente dal software e dagli strumenti specifici impiegati.

Centro di questa ricerca è il caso studio condotto su una sezione del campus SUPSI a Mendrisio. Si applica qui la metodologia sviluppata, concentrandosi sugli aspetti pratici dell'acquisizione dati, della modellazione e dell'analisi comparativa dei risultati ottenuti attraverso differenti approcci tecnologici.

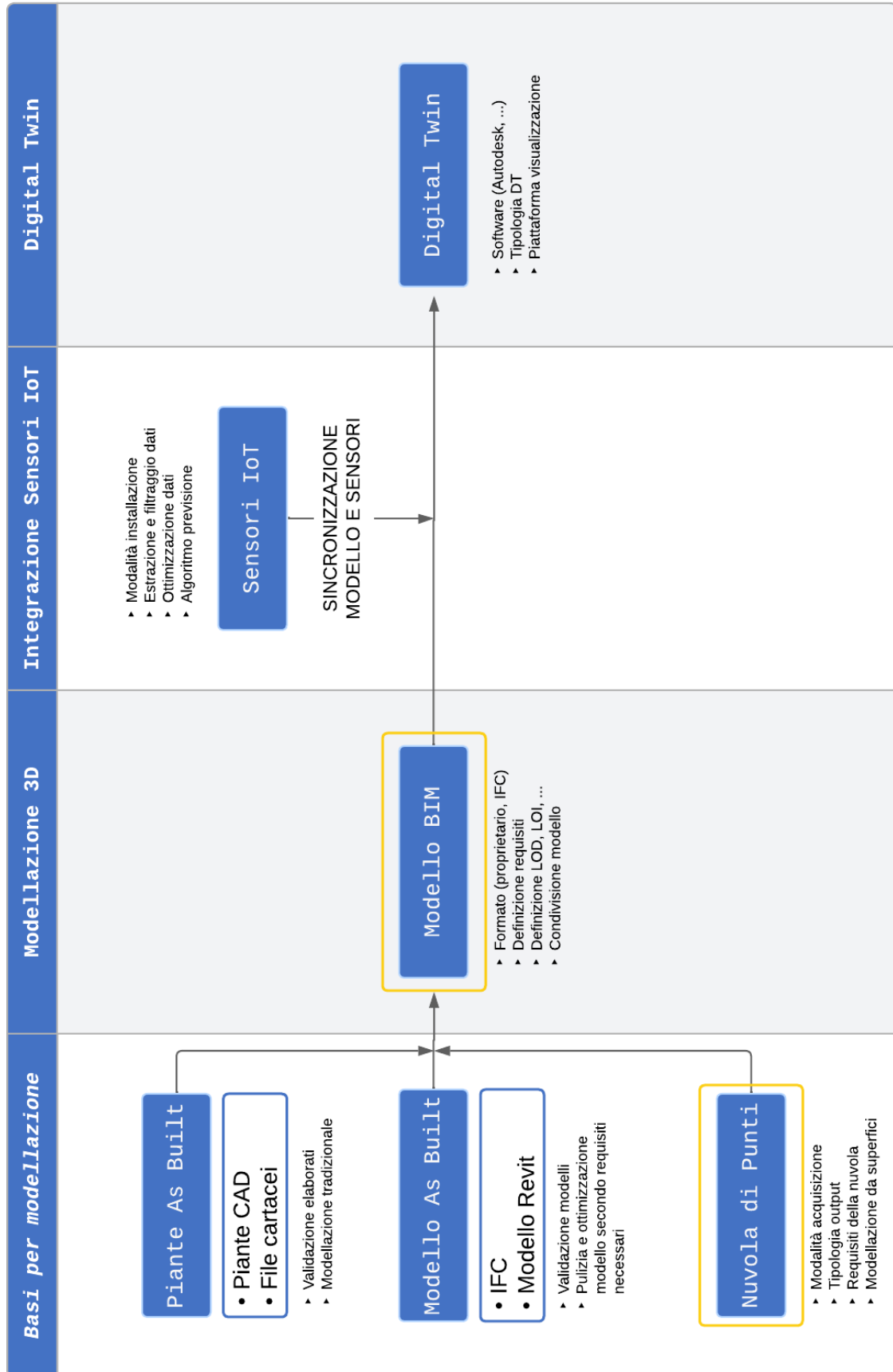
Va specificato che il presente elaborato si riserva di restringere il suo ambito per enfatizzare gli aspetti BIM del processo, evitando una disamina più approfondita delle analisi predittive dei dati e delle complessità dell'estrazione e filtraggio dell'output dei sensori. L'intenzione è quella di gettare solide basi per futuri sforzi di ricerca che possano ampliare il quadro iniziale qui presentato, particolarmente nei campi delle analisi predittive e dell'integrazione della tecnologia IoT all'interno del paradigma BIM.



2 Dal rilevamento dello stato di fatto al Digital Twin Predittivo

Focus della presente tesi è lo sviluppo e l'analisi del processo che, partendo dall'edificio esistente e in uso, porta alla generazione di un Digital Twin Predittivo: si parla di processo perché non vi è un'unica metodologia o un unico punto di partenza, in quanto ogni caso ha esigenze finali differenti (ottimizzazione spazi, consumi, ...) così come differenti sono gli strumenti, le competenze e il tempo a disposizione. Si è perciò tentato di prescindere da software proprietari e di analizzare differenti modalità di acquisizione dei dati.

Viene di seguito presentato il processo elaborato, con evidenziati per ogni passaggio gli elementi che lo contraddistinguono, i prerequisiti necessari e le criticità associate.





2.1. Obiettivi del processo

Il processo si inserisce all'interno di un più ampio contesto che vede un interesse sempre crescente per l'ottimizzazione degli edifici esistenti. Negli ultimi anni, infatti, il ruolo ricoperto dai consumi di un edificio durante la sua vita utile e il suo smaltimento a fine vita è stato approfondito con crescente interesse, risultando tanto impattante quanto le tecnologie e i materiali impiegati per la costruzione.

Risulta perciò fondamentale, in un'ottica di riduzione dei consumi e ottimizzazione delle risorse energetiche, l'efficientamento degli edifici esistenti, soprattutto per quanto riguarda la gestione degli spazi esistenti.

Il progetto all'interno del quale si inserisce la presente tesi si focalizza sull'ottimizzazione e la gestione di edifici esistenti ad uso uffici: il processo sviluppato si propone quindi di essere applicato a casi differenti tra loro, sia per quanto riguarda il materiale di partenza sia per gli obiettivi finali. Quest'ultimi, soprattutto, guidano lo sviluppo dello stesso, andando a definire i requisiti richiesti e desiderati dei vari passaggi e la quantità delle informazioni necessarie.

L'elemento di innovazione proposto dalla presente tesi è da trovarsi nell'integrazione e coordinazione di una serie di processi che nella pratica corrente sono separati tra loro e frequentemente realizzati da operatori differenti, come peraltro evidenziato nella literature review. L'integrazione, frutto anche di una innovativa e attenta definizione dei requisiti informativi del modello BIM alla base del Digital Twin, rende il metodo proposto efficiente ed efficace, riducendo i tempi e i costi richiesti per la sua utilizzazione sugli edifici esistenti. Benché il caso di studio sia un edificio a destinazione d'uso terziario, il metodo è utilizzabile anche per altre destinazioni d'uso.

Il workflow presentato si propone inoltre di distaccarsi da software proprietari o specifiche tecnologie, cercando invece di ottenere il risultato preposto con diversi mezzi, adattabili a seconda delle esigenze e delle disponibilità del mercato e del soggetto operante: come verrà poi analizzato, infatti, diverse sono le soluzioni all'avanguardia dal punto di vista informatico sviluppate negli ultimi anni che consentono una perfetta integrazione tra tutti i passaggi, ma queste sono spesso economicamente di difficile appannaggio o frutto di complessi codici di programmazione che prevedono la presenza sul progetto di soggetti esperti in materia.

2.2. Analisi del processo

Il processo propone tre elementi cardine, ognuno dei quali presenta diverse possibili alternative, che saranno analizzate nei capitoli successivi, con l'intenzione di individuare la più funzionale al caso studio prescelto, considerando anche gli strumenti a disposizione:

1. Sviluppo del modello BIM, a partire da:
 - nuvole di punti,
 - piante CAD
 - modelli esistenti;
2. Installazione di sensori IoT e sviluppo di algoritmi di previsione e ottimizzazione;
3. Integrazione tra modello e sensori, per ottenere un Digital Twin dell'edificio esistente.

Questi ultimi due punti saranno analizzati ai fini del processo e verrà presentato uno stato dell'arte al riguardo ma non saranno sviluppati in termini pratici o integrati nel caso di studio.

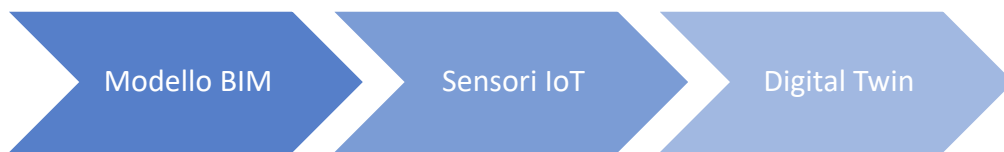


Fig. 1 Fasi del processo

Modello BIM

Per poter visualizzare intuitivamente e analizzare in relazione al contesto in cui sono inseriti i dati provenienti dai sensori si fa affidamento a un modello BIM, in cui gli elementi architettonici non sono semplicemente rappresentati, ma portano con sé informazioni su posizione, tipologia, relazione con gli altri elementi e con l'intero modello, fasi di realizzazione, etc.

Il D.Lgs. 50/2016 rende obbligatorio l'uso di processi BIM, per appalti pubblici di valore superiore ai 100 milioni di euro, dal 2019 in poi (con diminuzione del minimo fino all'obbligatorietà per tutti i nuovi progetti a partire dal 1° gennaio 2025, con il D.Lgs. 36/2023): ciò significa che prima di questa data, o in caso di appalti di valore inferiore o privati, non si ha

la certezza di poter contare su un modello 3D realizzato durante la fase progettuale e costruttiva dell'edificio. Si pone quindi il problema di come ricreare il modello di un edificio esistente, molto probabilmente in uso.

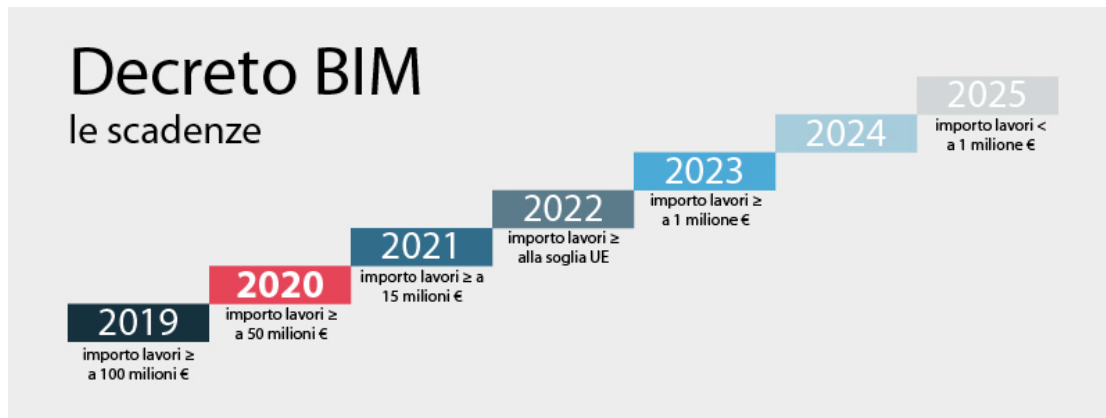


Fig. 2 Obbligatorietà processi BIM negli appalti

Per edifici realizzati successivamente all'avvento del CAD, Computer-Aided Design, si può fare affidamento su piante e sezioni 2D: in questo caso si procederà con una modellazione tradizionale, importando i file CAD all'interno del software BIM-based prescelto, allineandoli manualmente, o attraverso un sistema di coordinate condivise, ai livelli e alle griglie e utilizzando le basi 2D come guide per il modello 3D, di cui è necessario definire a priori i requisiti, il livello di dettaglio e di informazione necessari.

Nel caso in cui non siano disponibili i file CAD del progetto As Built o se l'edificio oggetto di ottimizzazione è stato realizzato precedentemente all'utilizzo di software per la progettazione il sistema più rapido per ottenere la geometria degli spazi è l'acquisizione di una nuvola di punti dai cui poi realizzare il modello 3D: questo processo è conosciuto come Scan-to-BIM. A seconda dei requisiti del modello finale, vi sono specifiche impostazioni di acquisizione e pulizia della nuvola di punti affinché, una volta importata all'interno del software BIM, questa possa fungere da base sia per un processo di modellazione tradizionale, specularmente a come si procede con le piante CAD, sia per modalità di modellazione semi-automatizzata degli elementi principali.

Il modello BIM viene quindi a costituire il contenitore per le informazioni relative al progetto, siano esse geometriche, relazionali o gestionali: è quindi necessario, a secondo dell'obiettivo specifico del processo, definire a priori quali siano i requisiti richiesti e poter quindi procedere



con un livello di dettaglio adeguato di elementi e dati contenuti nel modello e informazioni proveniente dallo stato di fatto; perciò, anche qualora l'edificio in studio sia di recente realizzazione e disponga quindi di un modello BIM già esistente, è comunque necessario procedere a adattarlo e pulirlo secondo le esigenze.

Sensori IoT

L'installazione di sensori collegati alla rete internet e quindi in grado di condividere i dati attraverso una piattaforma in tempo reale è la chiave fondamentale per costruire un sistema che permetta di monitorare le condizioni dell'edificio e allo stesso tempo fare previsioni sul suo comportamento futuro, così da riuscire a ottimizzare spazi e consumi.

Per permettere una corretta lettura dei dati è necessario che questi siano filtrati, ripuliti e mediati secondo parametri precedentemente concordati: i sensori, infatti, raccolgono e inviano dati continuamente determinando, nel caso in cui non vengano correttamente gestiti, a un eccesso di informazioni di difficile comprensione. Portando un esempio pratico, in caso di sensori di concentrazione di CO₂ potrebbe essere opportuno salvare i dati relativi alle ore di utilizzo dei locali (orario lavorativo e di pulizie) continuativamente così da rilevare l'affollamento e solo come media per quanto riguarda le ore di chiusura e notturne.

Per arrivare allo sviluppo di un Digital Twin si dovrà poi procedere a un'integrazione tra sensori IoT e modello 3D; questa avviene attraverso due canali:

- Integrazione visiva: i dati acquisiti dai sensori vengono mostrati in relazione al modello 3D per una più facile lettura, anche da parte di utenti non esperti del settore delle costruzioni o informatico;
- Integrazione informativa: i dati dei sensori vengono combinati con le informazioni contenute nel modello BIM e, attraverso algoritmi appositamente predisposti, permettono di sviluppare previsioni.

Per ottenere dati affidabili, risulta fondamentale e delicata la fase di scelta della tipologia e posizionamento dei sensori all'interno dei locali analizzati: ad esempio, sensori di temperatura posizionati troppo vicino a una finestra o alla posizione lavorativa di un impiegato potrebbero rilevare dati "falsati" che non rispecchiano le condizioni medie dell'ambiente in cui sono installati.

Digital Twin

Obiettivo finale del processo è l'implementazione del gemello digitale dell'edificio, sia per la visualizzazione dei dati contestualizzati rispetto all'ambiente a cui si riferiscono sia per l'ottimizzazione grazie ad algoritmi di calcolo. Come verrà approfondito in seguito, lo scopo è sviluppare un Digital Twin (DT) di Livello 2: ciò significa che il DT è in grado di fornire previsioni sul comportamento futuro, arrivando a illustrare diversi scenari basati su alternative di ottimizzazione.

Per lo sviluppo del Digital Twin esistono diversi software e piattaforme, che permettono di integrare i dati raccolti dai sensori con i modelli BIM: questi offrono funzionalità per la creazione, la gestione e l'utilizzo di repliche virtuali di oggetti fisici, sistemi o processi, integrando IoT, intelligenza artificiale e analytics per gestire efficacemente queste repliche digitali. A seconda delle necessità finali e delle risorse a disposizione, è necessario individuare la soluzione ottimale tra quelle proposte sul mercato, anche in relazione al costo e all'integrabilità con i file di modellazione realizzati.

2.3. Criticità e punti focali del processo

Punto focale del processo descritto è l'individuazione dei requisiti necessari allo sviluppo del modello per il Digital Twin: la definizione di questi, infatti, influenza non solo le caratteristiche e la completezza e precisione del modello BIM e quali elementi vanno inseriti al suo interno ma anche, e soprattutto, le informazioni che è necessario recuperare riguardo allo stato di fatto e il loro livello di dettaglio.

Nelle informazioni da reperire sono incluse anche le informazioni geometriche dell'edificio: sia che queste vengano da piante CAD che da nuvole di punti, conoscere il grado di approfondimento richiesto permette di individuare la metodologia di acquisizione e ricerca più efficiente.

Una prima criticità del processo è quindi legata alla collaborazione delle diverse parti coinvolte, dal cliente agli operatori del settore, che devono essere in grado di comunicare chiaramente e in modo completo le proprie necessità e richieste: il cliente deve essere in grado di definire lo

scopo del processo cosicché sia possibile esplicitare i requisiti minimi e procedere poi al coordinamento delle diverse discipline coinvolte.

Ancora più critico risulta il caso in cui a eseguire il processo sia un unico operatore o comunque un'unica compagnia: le fasi individuate sono molteplici e comprendono diversi ambiti; l'operatore deve essere perciò un esperto del settore, con conoscenze che spaziano dall'acquisizione di nuvole di punti all'installazione di sensori IoT e alla loro integrazione. Il caso di studio, infatti, descriverà anche parte del processo portata avanti da un utente non esperto e ne evidenzierà le maggiori difficoltà.

Infine, la maggiore criticità è probabilmente rappresentata dalla disponibilità di tecnologie avanzate e dall'interoperabilità delle piattaforme presenti: la ricerca, infatti, ha ormai sviluppato tecnologie in grado di automatizzare quasi completamente il processo attraverso il riconoscimento di oggetti da nuvole di punti dettagliate e la loro modellazione all'interno di ambienti BIM così da permetterne l'integrazione con sensori, ma i software in commercio si ricolgono ancora a una nicchia di professionisti, comportando un costo elevato e la tendenza a sviluppare formati proprietari. Per esempio, il caso studio presentato ha utilizzato strumenti e software per la gestione di nuvole di punti commercializzati da Leica, estremamente funzionali, potenti e in grado di permettere una semi automatizzazione del processo, che non sono però facilmente acquistabili da un utente medio.



3 Point Cloud e Scan-to-BIM

Le nuvole di punti rappresentano una tecnologia chiave nell'acquisizione di dati 3D, rivoluzionando il modo in cui otteniamo informazioni dettagliate sulle forme e le superfici degli oggetti in ambienti tridimensionali. Una nuvola di punti è essenzialmente un insieme massiccio di coordinate tridimensionali, ognuna associata a un riferimento nel nostro spazio fisico: questi punti, quando vengono elaborati e visualizzati insieme, formano una rappresentazione digitale dettagliata di un oggetto o di un ambiente.

La tecnologia Scan-to-BIM, acronimo di "Scan to Building Information Modeling", rappresenta un approccio innovativo nell'ambito della modellazione delle informazioni degli edifici. Essenzialmente, essa combina due concetti fondamentali: la scansione laser 3D e il BIM. La scansione laser 3D consente di acquisire dati precisi e dettagliati degli edifici esistenti, catturando le loro geometrie e caratteristiche in modo rapido e accurato. Una volta acquisiti questi dati, vengono elaborati e integrati in un modello BIM, che rappresenta virtualmente l'edificio con tutte le sue informazioni geometriche e semantiche. Questo processo fornisce agli architetti, ingegneri e progettisti un'importante risorsa per la pianificazione, il design e la gestione degli edifici esistenti, consentendo loro di lavorare con una base di dati accurata e dettagliata. Grazie alla tecnologia Scan-to-BIM, è possibile migliorare l'efficienza anche nella progettazione di opere di ristrutturazione, riducendo i rischi e i costi associati alla mancanza di informazioni precise sugli edifici esistenti.

Uno dei vantaggi più significativi della tecnologia Scan-to-BIM è la capacità di integrare una vasta gamma di dati provenienti da diverse fonti. Oltre alla scansione laser 3D, possono essere inclusi dati provenienti da rilievi topografici, immagini aeree, fotografie a 360 gradi e documentazione esistente dell'edificio, come elaborati grafici, schemi e relazioni. Integrando tutti questi dati in un unico modello BIM, gli utenti ottengono una rappresentazione completa e accurata dell'edificio esistente.

Oltre alla progettazione e alla costruzione, la tecnologia Scan-to-BIM supporta anche la gestione del ciclo di vita dell'edificio: una volta modellato utilizzando dati di scansione accurati,

il modello BIM può essere utilizzato per la gestione e la manutenzione quotidiana dell'edificio. Ad esempio, i responsabili possono accedere al modello BIM per individuare e risolvere problemi di manutenzione in modo tempestivo, pianificare gli interventi di riparazione e sostituzione, nonché monitorare lo stato e le prestazioni dell'edificio nel tempo.

3.1. Scan-to-BIM: stato dell'arte

Il concetto di Scan-to-BIM prevede l'integrazione delle tecnologie di laser scanning con i processi di Building Information Modeling (BIM) per digitalizzare le strutture e gli asset esistenti. Questa integrazione mira a creare modelli 3D accurati e dettagliati di edifici o infrastrutture, acquisendo i dati geometrici utilizzando tecnologie di scansione e traducendoli in modelli BIM digitali.

La combinazione della scansione laser con le tecnologie BIM migliora la visualizzazione, il coordinamento e i processi decisionali nella progettazione. Consente alle parti interessate di accedere a informazioni dettagliate sull'As-Built, facilitando le attività di ristrutturazione, retrofit e manutenzione. Aiuta inoltre nel rilevamento delle interferenze, nel coordinamento tra le varie discipline e nella documentazione accurata delle condizioni esistenti, riducendo gli errori, le rilavorazioni e i costi durante la fase di costruzione. Nel complesso, il processo Scan-to-BIM semplifica l'acquisizione dei dati, la gestione delle informazioni e la fase di modellazione, fornendo un approccio olistico agli elaborati di progetto e alla pianificazione dei progetti all'interno del settore AEC, promuovendo flussi di lavoro collaborativi, una rappresentazione accurata delle strutture esistenti e il miglioramento dei risultati dei progetti attraverso la trasformazione digitale.

Il processo prevede in genere diverse fasi (O. Roman, 2023):

1. Generazione di nuvole di punti: le caratteristiche dell'edificio vengono acquisite utilizzando set di dati di immagini o scansione laser per generare una nuvola di punti, che rappresenta la geometria 3D della struttura;
2. Fase di segmentazione: i dati della nuvola di punti vengono segmentati in cluster o regioni con proprietà simili per facilitare l'ulteriore elaborazione;
3. Fase di classificazione: ogni regione segmentata viene classificata ed etichettata in base alle sue caratteristiche e proprietà;

4. Fase di ricostruzione e modellazione: questa fase finale prevede la modellazione dei dati geometrici e semantici 3D, con la creazione vera e propria del modello BIM.

Inoltre, i dati vengono spesso pre-elaborati per ottimizzare i flussi di lavoro e ridurre le dimensioni dei file, anche se ciò può influire sulla qualità dei dati. Vari metodi di segmentazione, come la segmentazione basata sui bordi, vengono impiegati per estrarre segmenti dai dati 3D; le tecniche di machine learning sono comunemente utilizzate per la segmentazione e la classificazione automatica, mentre l'automazione della fase di ricostruzione rimane un aspetto complesso del processo Scan-to-BIM.

Scan-to-BIM e Scan vs BIM: vantaggi attuali nella modellazione

L'integrazione del BIM con le tecnologie di scansione laser è iniziata alla fine degli anni 2000. I ricercatori hanno utilizzato modelli BIM per la generazione automatica di Work Breakdown Structure (WBS) e li hanno combinati con immagini del sito per i rapporti sullo stato di avanzamento (Wesam Salah Alaloul, 2021). I progressi includono l'utilizzo di scanner laser per creare nuvole di punti 3D per il confronto con i modelli BIM 4D (tre dimensioni spaziali ed una temporale), consentendo la differenziazione dei progressi utilizzando bande di colore.

L'evoluzione dello Scan-to-BIM ha visto progressi significativi, sfruttando tecnologie come la scansione laser, la fotogrammetria e la modellazione 3D per migliorare il monitoraggio dell'avanzamento dei lavori. I ricercatori hanno esplorato varie metodologie come Scan-to-BIM e Scan-vs-BIM per un efficace monitoraggio del progetto.

Il metodo di rilevamento degli oggetti definito Scan-vs-BIM, allinea i dati del sito scansionati con i modelli BIM 3D esistenti per il monitoraggio dell'avanzamento del progetto con una migliore qualità dimensionale (Wesam Salah Alaloul, 2021). Questo metodo ha trovato applicazioni nella individuazione e localizzazione di armature, casseforme, componenti MEP e altro ancora; inoltre, l'integrazione del BIM con la fotogrammetria ha consentito il monitoraggio della distribuzione spaziale degli interni attraverso tecniche di visualizzazione e differenziazione Colour Coded.

I ricercatori hanno anche utilizzato in modo innovativo approcci di visione artificiale (CV, Computer Vision) con veicoli aerei senza pilota (UAV, Unmanned Aerial Vehicles) per rilevare componenti interni e aggiornare i progressi in ambienti BIM 4D. Questi progressi segnano lo

sviluppo dello Scan-to-BIM dalle sue fasi iniziali a metodologie più efficienti e accurate che svolgono un ruolo cruciale nell'automazione e nell'ottimizzazione nel settore delle costruzioni.

Integrazione nei processi di modellazione

Recenti attività di ricerca (S A Adekunle, 2022) si sono concentrate sull'integrazione del BIM con le tecnologie di scansione laser per ottenere la conformità BIM per gli edifici preesistenti: lo studio ha evidenziato il controllo di qualità e l'integrazione della fotogrammetria come temi caldi emergenti nell'ambito dello Scan-to-BIM, indicando le sfide e le opportunità per l'innovazione nello spazio Scan-to-BIM tra il 2007 e il 2020. Queste tendenze indicano una crescente enfasi sulla garanzia dell'accuratezza dei dati e sull'uso di tecniche di fotogrammetria per migliorare i processi di acquisizione e modellazione delle informazioni.

Oltre a quanto detto finora, i ricercatori stanno sviluppando tecniche per migliorare la qualità dei modelli BIM As-Built per le strutture esistenti, aprendo la strada a rappresentazioni digitali più affidabili e precise nel settore: le sfide identificate in una recente ricerca includono problemi relativi all'accuratezza dei dati, alla risoluzione spaziale, alla copertura e ad altre proprietà durante l'acquisizione dei dati di scansione. Garantire la qualità e la completezza dei dati di scansione rimane un traguardo chiave per i professionisti. Inoltre, l'automazione del processo di ricostruzione BIM è un punto focale, con la necessità di eliminare le indeterminazioni per ampliare l'applicabilità delle tecniche e migliorare l'accuratezza del riconoscimento attraverso la fusione dei dati provenienti da più sensori. Affrontando queste sfide e sfruttando le opportunità di innovazione, i ricercatori perfezioneranno l'efficienza delle metodologie Scan-to-BIM con il conseguente miglioramento nella gestione delle informazioni sugli edifici e i processi di modellazione.

Gli strumenti e le tecniche utilizzati per integrare i dati di scansione nel software BIM, come Autodesk Revit, comportano l'utilizzo di varie metodologie per semplificare il processo. Secondo (O. Roman, 2023), l'integrazione comporta in genere l'utilizzo della tecnologia di scansione laser per acquisire un accurato rilievo digitale dello stato di fatto degli edifici e creare modelli BIM As-Is. Questo processo di integrazione può essere migliorato attraverso lo sviluppo di moduli aggiuntivi o API (Application Programming Interface) su misura per piattaforme software specifiche come Autodesk Revit.

Le API sono componenti essenziali che facilitano la comunicazione e l'interazione tra diverse applicazioni software. Nel contesto dell'integrazione Scan-to-BIM, le API svolgono un ruolo cruciale nel consentire lo scambio di dati senza soluzione di continuità e l'interoperabilità tra gli strumenti di scansione laser, il software di elaborazione delle nuvole di punti e le piattaforme BIM come Revit. Sfruttando le API, gli sviluppatori possono creare soluzioni su misura che migliorano il trasferimento dei dati, la velocità di elaborazione, l'accuratezza e la compatibilità tra i dati di scansione e i modelli BIM all'interno di Autodesk Revit o di altre applicazioni software BIM.

Infine, come documentato in (Rabia Rashdi, 2022), l'implementazione efficace e definitiva dello Scan-to-BIM nel processo di Building Information Management, non potrà prescindere da una più semplice elaborazione dei dati, risolvendo i problemi di accuratezza del modello e quelli di interoperabilità.

Le sfide legate all'elaborazione dei dati derivano dalla natura dispendiosa, in termini di tempo, della gestione e dell'elaborazione di grandi quantità di dati di scansione, con conseguenti ritardi nel processo di modellazione. Inoltre, garantire l'accuratezza dei modelli generati dai dati di scansione può essere difficile, soprattutto quando si ha a che fare con componenti edilizi irregolari o complessi. I problemi di interoperabilità possono anche ostacolare la perfetta integrazione dei dati di scansione nel software BIM, influenzando la collaborazione tra le diverse parti interessate.

La letteratura suggerisce diverse alternative per affrontare queste sfide. Una soluzione proposta consiste nell'automatizzare l'elaborazione dei dati di scansione per semplificare il processo di modellazione e ridurre gli sforzi manuali. Inoltre, l'integrazione di più sensori e tecnologie, come la combinazione di dati di scansione 3D con i colori per il riconoscimento dei materiali, può migliorare l'accuratezza dei modelli prodotti. Per migliorare l'interoperabilità, i ricercatori raccomandano di utilizzare le famiglie di oggetti BIM disponibili online per generare Data Set codificati per il riconoscimento di oggetti basato su un apprendimento guidato. Lo sviluppo di linee guida per gli standard LOD, LOA e BIM può aiutare a standardizzare le pratiche e promuovere la coerenza nei processi Scan-to-BIM, affrontando i problemi di interoperabilità all'interno del settore.



Concentrandosi sull'automazione, sulla fusione dei dati provenienti da diversi sensori e sugli sforzi di standardizzazione, professionisti e ricercatori mirano a superare le sfide chiave associate all'implementazione di Scan-to-BIM.

Sviluppi futuri

Per individuare le direzioni di ricerca future e le tecnologie emergenti che potrebbero plasmare l'evoluzione delle pratiche Scan-to-BIM, si può prendere in considerazione l'esplorazione dell'integrazione di applicazioni di tipo Internet of Things (IoT), Cloud Computing e Intelligenza Artificiale (AI).

Tali ricerche possono così riassumersi:

1. Integrazione di dispositivi IoT: i dispositivi IoT possono essere integrati con le tecnologie di scansione laser per automatizzare i processi di raccolta dei dati, migliorare il monitoraggio in tempo reale e migliorare l'analisi delle prestazioni degli edifici all'interno dei modelli BIM. La ricerca in questo settore può concentrarsi sullo sviluppo di framework che sfruttano i sensori IoT per l'acquisizione e il monitoraggio dei dati nella gestione del ciclo di vita degli edifici.
2. Utilizzo del Cloud Computing: l'infrastruttura di cloud computing può essere sfruttata per l'archiviazione, l'elaborazione e la collaborazione efficienti dei dati delle nuvole di punti su larga scala generati dalla scansione laser. La ricerca potrebbe studiare soluzioni basate su cloud che consentano un accesso senza soluzione di continuità ai dati di scansione, promuovendo la collaborazione interdisciplinare e migliorando la scalabilità dei flussi di lavoro da scansione a BIM.
3. Applicazione dell'intelligenza artificiale: il potenziamento degli algoritmi di intelligenza artificiale, come l'apprendimento automatico e l'apprendimento profondo, potrà condurre all'automazione nell'elaborazione dei dati, al riconoscimento dei modelli e delle attività di identificazione degli oggetti nei flussi di lavoro Scan-to-BIM.

Le future direzioni di ricerca potrebbero portare, inoltre, allo sviluppo di modelli di intelligenza artificiale in grado di migliorare l'accuratezza, la velocità e la scalabilità dell'elaborazione dei dati delle nuvole di punti e della generazione di modelli BIM nelle varie fasi del ciclo di vita dell'edificio.



3.2. Acquisizione di nuvole di punti

Il processo di acquisizione delle nuvole di punti rappresenta il centro della tecnologia 3D, rivoluzionando il modo in cui informazioni tridimensionali dettagliate vengono raccolte e analizzate. Questo processo coinvolge l'utilizzo di avanzate tecnologie di scansione, quali laser scanner, fotogrammetria e sensori LiDAR (Light Detection And Range), al fine di catturare con precisione le coordinate tridimensionali degli oggetti in esame:

- I laser scanner sono strumenti fondamentali nell'acquisizione delle nuvole di punti. Funzionano emettendo un fascio laser sull'oggetto da esaminare: quando il laser colpisce la superficie, viene riflesso e rilevato dallo scanner, registrando la distanza tra lo strumento e il punto colpito. Questo processo viene ripetuto in modo sistematico, generando un insieme di coordinate tridimensionali che compongono la nuvola di punti.
- La fotogrammetria si basa sull'analisi di immagini fotografiche sovrapposte per ricavare informazioni tridimensionali. Utilizzando punti di riferimento comuni tra le immagini, il software di fotogrammetria elabora la geometria degli oggetti in modo accurato. La combinazione di diverse visuali contribuisce a ottenere una rappresentazione coerente in tre dimensioni.
- Anche i sensori LiDAR sfruttano il principio della riflessione della luce laser, ma a differenza dei laser scanner, raccolgono i dati non da stazione fissa ma con device in movimento.

Diversi sono gli elementi da tenere in considerazione durante l'acquisizione di una nuvola di punti:

1. **Tecnologia di acquisizione:** la scelta della tecnologia di acquisizione è fondamentale e dipende dalle esigenze specifiche del progetto. Ad esempio, la scansione laser LiDAR può essere ideale per terreni montuosi o urbanizzati, mentre la fotogrammetria può essere più adatta per aree più ampie e meno accessibili. È importante valutare attentamente le caratteristiche di ogni tecnologia per garantire la migliore qualità e accuratezza dei dati.
2. **Precisione e accuratezza:** la precisione e l'accuratezza dei dati acquisiti sono cruciali per molte applicazioni, soprattutto in settori come l'ingegneria civile, la pianificazione urbana e la gestione delle risorse naturali. Prima di iniziare l'acquisizione, è essenziale assicurarsi che gli strumenti siano correttamente configurati e calibrati per garantire la massima



precisione e accuratezza dei dati. Questo può includere la calibrazione dei sensori, l'allineamento degli strumenti e la verifica delle impostazioni di acquisizione per ottimizzare i risultati.

3. **Densità dei punti:** influisce direttamente sulla qualità e sui dettagli della rappresentazione tridimensionale dell'oggetto o dell'area scansionata. È importante valutare la densità dei punti in base alle esigenze specifiche del progetto, tenendo conto della dimensione e della complessità dell'oggetto da acquisire, nonché delle risorse disponibili per l'acquisizione e l'elaborazione dei dati.
4. **Condizioni ambientali:** luce solare, pioggia, nebbia o altre variabili, possono influenzare la qualità dei dati acquisiti. È importante monitorare attentamente le condizioni ambientali durante l'acquisizione e, se necessario, pianificarla in situazioni ottimali per garantire risultati migliori.
5. **Controllo di qualità durante l'acquisizione:** è importante monitorare costantemente la qualità dei dati per identificare eventuali problemi o errori in tempo reale. Questo può includere il controllo della copertura dei punti, la verifica della coerenza tra le diverse scansioni e la correzione degli eventuali problemi tecnici per garantire risultati affidabili.
6. **Pianificazione dell'acquisizione:** è fondamentale per ottimizzare l'efficienza e la qualità dei dati. Ciò può includere la definizione delle aree di interesse, la pianificazione del percorso di scansione e la gestione delle risorse per garantire una copertura completa e omogenea.

3.3. Applicazione dello Scan-to-BIM

Nell'ambito del progetto sono state analizzate diverse metodologie per lo Scan-to-BIM, in modo da individuare la più efficiente secondo tempi, disponibilità degli strumenti e costi. Immaginando di avere diverse disponibilità di strumenti e competenze tecniche sono state condotte un'acquisizione con tecnologia LiDAR su device mobile, un'acquisizione con laser scanner statico e una con laser scanner portatile.

Scopo di queste nuvole di punti è ricavare tutte le informazioni necessarie alla modellazione BIM, senza però gravare eccessivamente sugli hardware e in relazione alle competenze tecniche dell'operatore.

L'acquisizione con device mobile è stata condotta al fine di simulare il processo di Scan-vs-BIM: ci si è infatti posti nella condizione in cui le principali informazioni geometriche derivano dalle piante depositate nella fase di progetto dell'edificio e la nuvola di punti viene utilizzata come confronto e verifica di queste, senza dover però ricorrere a strumenti specifici e tecnici specializzati. Come sarà poi evidenziato, infatti, non sempre le informazioni a disposizione del progettista sono corrette e riferite all'ultima condizione dell'edificio in oggetto: spesso sono state apportate varianti durante la vita utile dell'edificio o addirittura durante le fasi di costruzione.

Il processo di Scan-to-BIM è stato impostato sulle acquisizioni provenienti da laser scanner: la quantità di dati raccolta e la loro affidabilità permettono infatti di ricostruire la geometria dell'edificio senza il bisogno di ricorrere alle piante. Questo scenario rappresenta tutte le situazioni in cui gli elaborati progettuali non sono disponibili o sono estremamente datati, portando alla necessità di effettuare più di una semplice verifica rispetto allo stato As-Is.

Nell'ambito dello Scan-to-BIM sono stati analizzati due diversi scenari: il primo utilizza i dati acquisiti nella nuvola di punti come base per una modellazione tradizionale mentre il secondo tenta di arrivare a una semi automatizzazione del processo, attraverso l'estrazione di una mesh e la modellazione tramite il riconoscimento delle superfici.

Quest'ultimo scenario si pone come esempio di una situazione piuttosto diffusa all'interno dell'industria delle costruzioni nei riguardi del BIM: non sempre all'interno di un'organizzazione, infatti, sono disponibili operatori con competenze in materia elevate e la possibilità di automatizzare in parte il processo permette di dividere il lavoro anche tra gli operatori meno esperti.

4 Modello BIM

Il Building Information Modeling (BIM) rappresenta una rivoluzione nel settore dell'architettura, dell'ingegneria e delle costruzioni (AEC). Si tratta di una metodologia che integra la gestione delle informazioni e la modellazione digitale tridimensionale, consentendo una visione completa e coordinata di un progetto edilizio. Il BIM non è solo un insieme di strumenti software avanzati; è un approccio collaborativo che coinvolge tutte le fasi del ciclo di vita di un edificio, dalla progettazione alla costruzione, alla gestione e manutenzione, fino alla demolizione e smaltimento a fine vita.

Al centro del BIM c'è il concetto di "Modello Digitale". Questo non è solo una rappresentazione tridimensionale, ma un database informativo che contiene dati dettagliati su ogni componente dell'edificio. Come detto, il BIM non si limita alla fase di progettazione e costruzione: include, infatti, anche la gestione dell'edificio nel tempo. Tutte le modifiche, gli interventi manutentivi e gli aggiornamenti vengono acquisiti nel modello digitale, fornendo un registro completo che può essere utilizzato per ottimizzare tutte le decisioni, presenti e future.

4.1. Stato dell'arte

4.1.1. Il BIM e la sua evoluzione

Per introdurre il concetto di Building Information Modeling e il suo significato nel settore AEC, è importante capire che il BIM è una rappresentazione digitale di una struttura costruita che incorpora informazioni geometriche e non geometriche. Questo modello completo prende in considerazione vari aspetti come la geometria 3D dei componenti dell'edificio, i materiali, le proprietà tecniche, i costi, le relazioni tra gli elementi, gli abachi e altro ancora.

Il BIM non riguarda solo la creazione di modelli digitali di edifici, ma comporta anche la manutenzione, l'utilizzo e lo scambio di questi modelli durante l'intero ciclo di vita di una struttura: facilita la collaborazione tra i diversi stakeholder nelle varie fasi del progetto,

consentendo l'inserimento, l'estrazione, l'aggiornamento e la modifica delle informazioni per supportare e riflettere i ruoli di ciascuna parte interessata.

L'importanza del BIM nel settore AEC risiede nel suo impatto trasformativo sull'efficienza, la produttività e la qualità del progetto; utilizzando il BIM, i team di progetto possono semplificare i processi, migliorare il coordinamento, migliorare la visualizzazione, facilitare la stima dei costi, supportare le iniziative di sostenibilità e consentire un migliore processo decisionale durante l'intero ciclo di vita di un progetto.

Nel complesso, il BIM rivoluziona le pratiche di costruzione tradizionali fornendo una piattaforma digitale per la gestione olistica dei progetti, consentendo una migliore pianificazione, progettazione, costruzione e funzionamento degli edifici. La sua adozione è diventata fondamentale per le aziende AEC che mirano a rimanere competitive nel panorama industriale in continua evoluzione.

Evoluzione del BIM

La tecnologia BIM affonda le sue radici nel primo concetto di modellazione 3D alla fine del 20° secolo, che si è poi evoluto fino a includere varie dimensioni come il 4D per l'elaborazione e la programmazione della costruzione nel tempo, il 5D per la stima dei costi, il 6D per la sostenibilità e il 7D per la gestione e la manutenzione delle strutture. Il concetto di BIM è nato come risposta alla bassa produttività e alla mancanza di coordinazione tra i vari attori nel settore delle costruzioni, con un'implementazione iniziale avvenuta nel settore AEC nei primi anni '90.

Da allora la tecnologia BIM ha fornito una serie di vantaggi diretti e indiretti, semplificando e migliorando i processi di progettazione e costruzione sotto molteplici aspetti. L'adozione del BIM ha portato a una maggiore precisione nelle stime dei costi, a un notevole risparmio sui costi e a una riduzione dei tempi di consegna dei progetti: ad esempio, l'importo dei costi non preventivati è stato ridotto di circa il 40% con l'aiuto delle tecnologie BIM. Inoltre, nel 2004 il Construction Industry Institute ha stimato che una parte sostanziale del costo di costruzione viene sprecata, evidenziando il potenziale risparmio sui costi attraverso l'implementazione del BIM. In vari paesi, come il Regno Unito, sono stati ottenuti significativi risparmi sui costi

attraverso l'uso della tecnologia BIM, portando a ulteriori sviluppi sul piano politico e iniziative come la approccio Digital Built Britain.

Nel complesso, la tecnologia BIM non solo ha migliorato l'efficienza del progetto, l'economicità e la precisione, ma ha anche migliorato la collaborazione tra le parti interessate, migliorato la comunicazione e guidato l'innovazione nel settore delle costruzioni. Il suo continuo sviluppo e adozione rappresentano un progresso significativo nella gestione dei progetti e nelle pratiche di consegna.

Secondo (Ali Ghaffarianhoseini, 2017), l'adozione del BIM ruota intorno ai seguenti punti chiave:

- L'adozione del BIM è fortemente influenzata da fattori quali il supporto gestionale, il supporto tecnico, le capacità di compatibilità BIM e la cultura organizzativa.
- La fattibilità del BIM all'interno del settore AEC è fondamentale per il successo della sua adozione, sottolineando l'importanza delle capacità tecnologiche e dell'interoperabilità.
- La collaborazione tra i diversi settori all'interno delle aziende AEC è essenziale per un'implementazione BIM di successo.
- Le parti interessate nei progetti, inclusi architetti, project manager e ingegneri, sono coinvolte in attività sempre più complesse che possono beneficiare della tecnologia BIM.

Inoltre, i fattori che influenzano l'adozione del BIM includono la commerciabilità della tecnologia, la fattibilità operativa, la facilità di utilizzo del software, la disponibilità delle competenze necessarie e l'adeguatezza delle risorse hardware.

Concetti chiave

(Thomas Czerniawski, 2020) delinea vari punti chiave associati al BIM, inclusa la rappresentazione digitale delle caratteristiche fisiche e funzionali di una struttura, le informazioni geometriche e i processi di modellazione che coinvolgono la selezione e la rappresentazione.

Il BIM funge da sistema di rappresentazione digitale degli edifici, consentendo alle parti interessate del settore edile di avere un maggiore controllo sull'ambiente costruito facilitando la simulazione, l'automazione e la condivisione delle informazioni. Le informazioni geometriche svolgono un ruolo fondamentale nel BIM, descrivendo la forma e la disposizione

dei componenti dell'edificio, nonché le relazioni come l'aggregazione, le connessioni topologiche e direzionali.

La modellazione in BIM comporta processi decisionali basati sulla pertinenza e sulla convenienza, in cui i modellatori selezionano e includono le informazioni essenziali ignorando i dati irrilevanti. Il livello di fedeltà nella modellazione geometrica è una considerazione chiave, con opzioni che vanno dalle rappresentazioni ad alta fedeltà che utilizzano mesh triangolari e nuvole di punti a rappresentazioni a bassa fedeltà attraverso primitive geometriche e tecniche di approssimazione come piani, linee, rettangoli e superfici curve più complesse rappresentate da spline di Bezier e NURBS.

In conclusione, i concetti fondamentali associati al BIM comprendono la rappresentazione digitale dell'edificio, le informazioni geometriche, i processi di modellazione e la selezione dei dettagli rilevanti ai fini della modellazione.

Benefici e barriere all'implementazione del BIM

In (Mohammadsaeid Parsamehr, 2023), vengono ampiamente discussi i vantaggi dell'implementazione del BIM nel settore delle costruzioni, tra i quali i principali sono:

- Comunicazione migliorata: il BIM consente una migliore comunicazione tra tutte le parti coinvolte nel progetto, portando a una migliore collaborazione e coordinamento.
- Continuità dei dati e informazioni strutturate: il BIM aiuta a prevenire la ridondanza e sovrapposizione delle voci e le discontinuità dei dati causate dalla mancanza di comunicazione tra le parti interessate, fornendo dati strutturati anziché non strutturati, il che consente l'esecuzione parzialmente automatizzata del processo.
- Attualità e qualità dei dati: il BIM porta a una migliore attualità e qualità dei dati, garantendo che le informazioni sul progetto rimangano aggiornate e accurate.
- Processi standardizzati: Il BIM consente di standardizzare i processi, migliorando la coerenza e l'efficienza nei flussi di lavoro del progetto.
- Miglioramento della qualità e della velocità del processo: il BIM facilita la misurazione della qualità e della velocità del processo, portando a una consegna e una gestione del progetto più efficienti.

- Vantaggi specifici della pianificazione: il BIM aiuta ad apportare modifiche direttamente nel modello 3D, prevenendo così errori nella pianificazione 2D. Consente inoltre di standardizzare i contenuti di pianificazione, i controlli automatizzati dei modelli 3D, di migliorare la qualità della pianificazione attraverso i controlli delle interferenze e di migliorare il coinvolgimento e la comprensione di tutte le parti interessate alla pianificazione.

Nonostante gli evidenti vantaggi, anche altri fattori che influenzano l'adozione del BIM: (Ali Ghaffarianhoseini, 2017) discute l'importanza della fattibilità del BIM all'interno del settore AEC come fattore vitale per il successo dell'adozione del BIM. La ricerca ha identificato che solo il 22% delle aziende AEC ha integrato con successo il BIM nelle proprie operazioni, sottolineando l'importanza della collaborazione interdipartimentale. Inoltre, l'indice di frequenza BIM ha dimostrato che il BIM è utilizzato prevalentemente per la modellazione dell'involucro edilizio e la localizzazione del progetto, indicando l'alto valore derivato da queste attività rispetto alla difficoltà associata. Tuttavia, le attività di monitoraggio della sostenibilità e sicurezza mostrano un rapporto valore/difficoltà negativo, il che implica maggiori difficoltà nell'utilizzo del BIM per queste funzioni rispetto al valore fornito.

Le principali sfide identificate dagli intervistati includono l'usabilità del software, la mancanza di competenze pertinenti e l'inadeguatezza dell'hardware. Ciò evidenzia l'importanza di affrontare queste sfide per facilitare un'adozione più agevole del BIM tra le aziende AEC. L'adozione del BIM è quindi associata a cinque aree chiave: supporto gestionale, supporto tecnico, capacità di compatibilità BIM e cultura organizzativa. Identificare e affrontare queste sfide, rischi e preoccupazioni è fondamentale per promuovere un'implementazione BIM di successo all'interno del settore AEC.

Le sfide relative all'interoperabilità del software e allo scambio di dati (Ziwen Liu Y. L., 2021) includono le difficoltà nel trasferimento dei dati da uno strumento di authoring BIM al software di analisi delle prestazioni degli edifici (BPA – Building Performance Analysis). Lo standard IFC (Industry Foundation Classes), utilizzato nel BIM per il coordinamento dei dati, è stato utile per le analisi e le simulazioni di edifici green. Tuttavia, quando si trasferiscono i dati BIM a specifiche analisi delle prestazioni dell'edificio, sorgono limitazioni, portando potenzialmente a una sostanziale perdita di dati. Inoltre, è stata notata l'assenza di un dominio energetico nello

schema IFC, suggerendo la necessità di un'estensione per consentire uno scambio di dati più efficiente.

Per mitigare gli errori durante il trasferimento dei dati, è importante affrontare le differenze nella configurazione iniziale del modello BIM e nelle regole di modellazione piuttosto che i problemi con l'elaborazione dei file IFC. La personalizzazione delle proprietà all'interno del modello di dati IFC può consentire una certa localizzazione per acquisire informazioni univoche rilevanti per le valutazioni di sostenibilità come LEED, BREEAM e BEAM Plus. Lo sviluppo di un modello di dati IFC localizzato basato sullo standard può aiutare a soddisfare efficacemente le esigenze di valutazione della sostenibilità.

Sviluppi tecnologici e trend futuri

Per approfondire gli sviluppi tecnologici e le tendenze nella tecnologia BIM è fondamentale evidenziare l'integrazione di tecnologie avanzate e il passaggio all'Integrated Digital Delivery (IDD) nella gestione sostenibile degli edifici, grazie all'emergere di ambienti BIM dinamici, la fusione del BIM con altre tecnologie all'avanguardia e la transizione verso un approccio collettivo di applicazione di più tecnologie nel BIM; questa tendenza mira a sfruttare la potenza di varie tecnologie per migliorare il BIM e i processi decisionali durante l'intero ciclo di vita dell'edificio.

Anche l'integrazione del BIM con i sistemi informativi geografici (GIS), i sistemi di gestione delle strutture e la tecnologia dei gemelli digitali rientra tra le ultime evoluzioni nell'ambito BIM, migliorando l'interoperabilità, la comprensione della gestione delle strutture e consentendo capacità decisionali predittive attraverso gli algoritmi del Digital Twin (DT).

In (Zezhou WU, 2022), vengono discusse le future tendenze di ricerca del coordinamento basato sul BIM nella gestione dei progetti: in particolare, l'articolo evidenzia l'importanza di un ulteriore sviluppo della tecnologia digitale, come i big data, l'apprendimento automatico, la blockchain e le strategie di integrazione dei gemelli digitali, per migliorare l'efficienza della gestione dei progetti. Inoltre, l'esplorazione dell'integrazione del BIM con il cloud computing e l'IoT per il monitoraggio dei consumi in tempo reale, la gestione delle risorse e la gestione della catena di approvvigionamento presenta opportunità significative per ulteriori attività di ricerca e sviluppo nella tecnologia BIM.

I progressi nei gemelli digitali permettono la creazione di rappresentazioni virtuali di sistemi fisici, consentendo una migliore visualizzazione, monitoraggio e manutenzione predittiva. Ciò può portare a un miglioramento del processo decisionale, a una maggiore efficienza operativa e a tempi di inattività ridotti al minimo in vari settori, come quello manifatturiero, edile e sanitario (Mathias Minos-Stensrud, 2018). Le tecnologie di progettazione generativa sfruttano gli algoritmi e l'intelligenza artificiale per esplorare numerose possibilità di progettazione e ottimizzare le soluzioni in base a vincoli specifici: questa innovazione semplifica il processo di progettazione, migliora la creatività e produce soluzioni altamente efficienti e innovative in diversi settori, tra cui l'architettura, l'ingegneria e il design del prodotto.

I progressi della robotica, in particolare nell'automazione e nei sistemi autonomi, rivoluzionano i processi industriali aumentando la produttività, garantendo la precisione e migliorando la sicurezza sul posto di lavoro.

4.1.2. BIM e automazione

Il concetto di modellazione 3D digitale automatizzata prevede l'uso di tecnologie avanzate per creare rappresentazioni digitali tridimensionali di oggetti o ambienti del mondo reale senza un intervento manuale significativo.

La modellazione 3D digitale automatizzata utilizza spesso dispositivi di acquisizione della realtà, visione artificiale e sofisticati algoritmi di modellazione 3D per generare modelli dettagliati in modo efficiente e accurato. Il processo include in genere passaggi come la ricostruzione 3D, la modellazione semantica, la modellazione geometrica e l'integrazione del BIM per creare rappresentazioni digitali precise. La modellazione 3D digitale automatizzata svolge un ruolo chiave in settori come l'edilizia, l'architettura e la produzione, consentendo la generazione di modelli 3D realistici per la visualizzazione, l'analisi, le simulazioni e varie altre applicazioni.

(Ali Khudhair, 2021) fornisce una panoramica dettagliata sull'evoluzione della modellazione automatizzata all'interno del BIM, discutendo le tendenze attuali e le potenziali aree di ricerca: questa è ancora in una fase iniziale, con un potenziale significativo in vari aspetti, come l'integrazione della tecnologia 4D nell'analisi della sicurezza di strutture variabili nel tempo e la combinazione del BIM 4D con i sistemi informativi geografici (GIS) per tracciare la logistica

dell'approvvigionamento dei materiali e l'attività di costruzione; la ricerca affronta inoltre lo sviluppo di un modello di estrazione di informazioni topologiche (TIEM), che si concentra sull'acquisizione e l'organizzazione automatica delle relazioni topologiche spaziali nel BIM.

In (Ali Khudhair, 2021) viene presentata una ricostruzione 3D automatizzata nelle fabbriche delle PMI e la generazione di modelli di gemelli digitali in modo parzialmente automatizzato ed economico: la ricerca esplora l'uso di sensori a basso costo per la ricostruzione 3D e l'applicazione di sistemi autonomi nella creazione di modelli di gemelli digitali; includendo, invece, le informazioni provenienti da modellazione digitale automatizzata di edifici esistenti (Thomas Czerniawski, 2020) esamina i metodi di riconoscimento degli oggetti: l'articolo presenta tecniche come la ricostruzione 3D, la modellazione semantica, la modellazione geometrica e la modellazione delle informazioni sugli edifici per migliorare la comprensione del flusso di lavoro di automazione nelle applicazioni di modellazione 3D digitale.

(Mohammadsaeid Parsamehr, 2023) introduce l'uso della modellazione parametrica, della progettazione generativa e dell'intelligenza artificiale per la modellazione 3D automatizzata, illustrando l'applicazione del BIM per la pianificazione, la stima dei costi, la gestione della qualità e i processi di gestione della sicurezza nei progetti.

In conclusione, l'adozione e l'integrazione di strumenti software avanzati nel settore AEC, in particolare nel contesto del BIM e di altre tecnologie innovative, sono fondamentali per automatizzare vari aspetti della gestione dei progetti e dei processi di costruzione, guidando il processo decisionale e i risultati del progetto e migliorando in ultima analisi la produttività.

Limitazioni

L'uso di tecniche di automazione della modellazione geometrica svolge un ruolo cruciale nel migliorare l'accuratezza e la precisione nella creazione e nell'analisi dei modelli 3D (Mansour Esnaashary Esfahani, 2021); gli approcci di modellazione manuale e semi-automatica sono stati valutati per il loro impatto sull'accuratezza e la precisione dei BIM 3D generati: i risultati indicano che la precisione nella modellazione di oggetti secondari è stata superiore a quella degli oggetti primari quando sono stati adottati processi di modellazione manuale. Inoltre, lo studio ha evidenziato l'importanza di standardizzare i processi di modellazione manuale e di fornire sessioni di formazione per i modellisti per migliorare l'accuratezza e la precisione nei

BIM. Anche (André Borrmann, 2018) discute le difficoltà nell'ottenere un processo completamente automatizzato nei sistemi BIM: le complessità sorgono a causa della necessità dell'intervento umano nelle attività di modellazione per gestire fattori come geometrie complesse di oggetti, disordine, occlusioni e ambienti di costruzione vari.

Sebbene siano stati sviluppati algoritmi avanzati di riconoscimento e adattamento, l'automazione completa rimane una sfida nel settore delle costruzioni: il processo di modellazione manuale è dispendioso in termini di tempo, laborioso, soggettivo e richiede modellatori qualificati; pertanto, un approccio ibrido che combina tecniche manuali e semi-automatizzate è spesso favorito a causa della natura intricata dei progetti di costruzione.

Per quanto riguarda l'implementazione di flussi di lavoro automatizzati all'interno dei processi AEC esistenti, (Ziwen Liu Y. L., 2019) presenta la trasformazione del settore AEC legata potenzialmente a tecnologie emergenti: in particolare, viene fatto riferimento ai cluster Accelerating Stage e Transforming Stage, che descrivono le sfide e gli adattamenti nel settore dovuti all'introduzione di nuove tecnologie come il BIM.

In merito alle applicazioni della modellazione 3D digitale automatizzata in architettura (Thomas Czerniawski, 2020) approfondisce l'importanza della valutazione dell'incertezza nelle ricostruzioni dei modelli 3D, evidenziando come la stima delle incertezze associate ai sistemi di misura e alle tecniche di modellazione sia fondamentale per migliorare l'accuratezza: le imprecisioni nei modelli 3D possono avere un impatto negativo su applicazioni come il monitoraggio dei rischi e la precisione dei modelli. Inoltre, la propagazione degli errori avviene in ogni fase del processo completo di Scan-to-BIM, a partire dal posizionamento del dispositivo di raccolta dati fino alla generazione finale del modello As-Built, da cui la necessità di valutare le incertezze e gli errori nel processo di modellazione 3D automatizzato.

Nonostante le limitazioni evidenziate, (Ali Khudhair, 2021) prende in considerazione l'utilizzo di sensori a basso costo, tecniche di localizzazione e mappatura simultanea (SLAM - Simultaneous Localization and Mapping), droni autonomi e soluzioni di scansione 3D economiche per la generazione di modelli di gemelli digitali nelle fabbriche delle PMI, offrendo nuove prospettive su come i professionisti possono sfruttare le moderne tecnologie per la ricostruzione 3D e lo sviluppo di gemelli digitali negli ambienti di produzione.

Tendenze future

(Qing-Jie Wen, 2021) approfondisce i progressi e le tendenze della ricerca sul Building Information Modeling, facendo luce sull'evoluzione degli edifici commerciali di nuova generazione e sul concetto di smart building: la ricerca indica uno spostamento verso edifici intelligenti che integrano vari sistemi edilizi attraverso i sistemi di automazione degli edifici (BAS – Building Automation System). L'integrazione del BIM con il BAS offre opportunità per migliorare l'automazione e il controllo dei sistemi dell'edificio, portando a prestazioni ed efficienza ottimizzate dell'edificio; inoltre, la ricerca evidenzia l'importanza delle soluzioni integrate basate su 4D nei progetti di costruzione, sottolineando la necessità di una modellazione dinamica che combini i modelli BIM con gli stati di avanzamento di progetto.

L'uso di tecnologie di automazione nell'analisi della sicurezza e nel monitoraggio della logistica dei materiali, insieme all'integrazione di 4D-BIM con GIS per il monitoraggio completo del progetto, presenta un potenziale significativo per i progressi nella modellazione 3D digitale automatizzata nel settore AEC.

Inoltre, lo sviluppo di modelli di estrazione di informazioni topologiche svolge un ruolo cruciale nella comprensione delle relazioni spaziali e della connettività degli elementi edilizi: poiché l'industria continua a concentrarsi sul miglioramento delle prestazioni e dell'efficienza degli edifici, è probabile che l'utilizzo di tecnologie avanzate per l'estrazione e l'analisi dei dati topologici dai modelli BIM apra la strada a processi di modellazione 3D più sofisticati e automatizzati nel settore AEC.

4.2. LOD, LOG e LOI

Per definire i requisiti necessari e desiderati del modello BIM si è deciso di far riferimento alle norme nazionali UNI 11337 e ISO 19650.

Nella UNI 11337 vengono introdotti i concetti di Level of Geometry, Level of Information e Level of Detail, che vanno a definire le informazioni contenute nel modello BIM secondo una scala di approfondimento.

LOD – Level of Development da UNI 11337-4			LOD Level of Development
	LOG – Attributi geometrici Oggetto 3D	LOI – Attributi informativi Scheda Informativa	
LOD A Oggetto Simbolico	LOG A Rappresentazione geometrica simbolica	LOI A Caratteristiche quantitative/qualitative indicative	LOD 100
LOD B Oggetto Generico	LOG B Rappresentazione geometrica generica	LOI B Caratteristiche quantitative/qualitative approssimate	LOD 200
LOD C Oggetto Definito	LOG C Rappresentazione geometrica definita	LOI C Caratteristiche quantitative/qualitative generiche	LOD 300
LOD D Oggetto Dettagliato	LOG D Rappresentazione geometrica dettagliata	LOI D Caratteristiche quantitative/qualitative specifiche	LOD 350
LOD E Oggetto Specifico	LOG E Rappresentazione geometrica specifica	LOI E Caratteristiche quantitative/qualitative del prodotto	LOD 400
LOD F Oggetto Eseguito	LOG F Rappresentazione geometrica As Built	LOI F Caratteristiche quantitative/qualitative come installato	LOD 500
LOD G Oggetto Aggiornato	LOG G Rappresentazione geometrica aggiornata rispetto all'originaria	LOI G Caratteristiche quantitative/qualitative aggiornate rispetto all'originaria	N/A

Fig. 3 Scala LOD, LOG, LOI

Livello di Geometria (LOG)

Il LOG si riferisce al livello di dettaglio della rappresentazione geometrica di un oggetto all'interno di un modello informativo. Questo concetto è cruciale nei modelli BIM, dove gli oggetti sono rappresentati tramite geometria tridimensionale. Il LOG può variare a seconda delle esigenze del progetto e delle fasi del processo progettuale. Ad esempio, nelle fasi iniziali del progetto, potrebbe essere sufficiente avere una rappresentazione geometrica approssimativa degli oggetti, mentre nelle fasi successive potrebbe essere necessario aumentare il dettaglio per consentire la valutazione accurata di aspetti come l'interferenza tra gli elementi o la visualizzazione realistica dell'oggetto da realizzare.

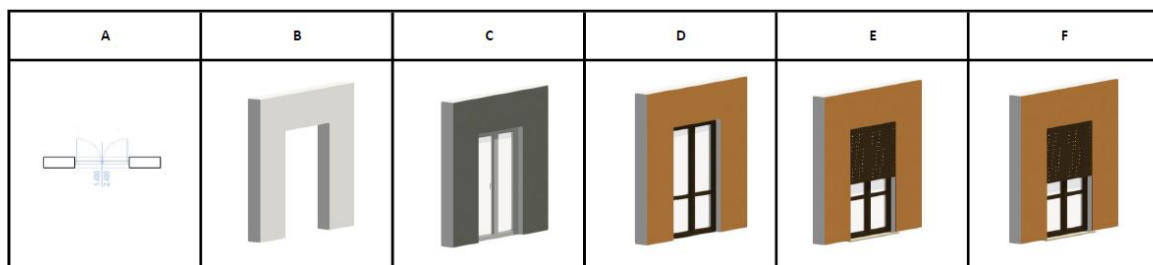


Fig. 4 Esempi modellazione secondo LOG crescente

Livello di Informazione (LOI)

Il LOI indica il grado di completezza e dettaglio delle informazioni associate agli oggetti all'interno di un modello informativo. Oltre alla geometria, i modelli BIM contengono una vasta gamma di informazioni pertinenti ai diversi aspetti del progetto, come specifiche tecniche, materiali, costi, programmi di manutenzione, e così via. Anche il LOI varia a seconda delle esigenze del progetto e delle fasi del processo progettuale; assicurare un elevato LOI è cruciale per supportare decisioni informate e consentire una gestione efficace del progetto durante tutto il suo sviluppo.

Livello di Sviluppo (LOD)

Il LOD rappresenta il grado di sviluppo delle informazioni associate agli oggetti all'interno di un modello informativo in un determinato momento del processo progettuale. Questo concetto è strettamente correlato a quello di "maturità" delle informazioni: ad esempio, nelle prime fasi del progetto, le informazioni possono essere di natura più concettuale o preliminare, mentre nelle fasi successive diventano più dettagliate e complete. Definire chiaramente il LOD è essenziale per garantire che le parti coinvolte comprendano il grado di affidabilità e precisione delle informazioni contenute nel modello BIM.






LOD 100	LOD 200	LOD 300	LOD 400	LOD 500
				
Modello contenente i requisiti di prestazione e le specifiche del sito. Modello concettuale di massa utile allo studio di tutto l'edificio inclusi area di base e volume, orientamento, stima costi iniziale. Progetto preliminare.	Modello contenente i sistemi generalizzati con quantità, dimensioni, forme, posizione ed orientamento approssimati. Progetto definitivo.	Modello di produzione o pre-costruzione, e per gli "intenti progettuali". Modello accurato e coordinato, utile per una stima più accurata dei costi. Progetto Esecutivo.	Modello accurato con i requisiti di costruzione e gli elementi costruttivi specifici.	Modello "as built" dell'edificio che mostra il progetto così come è stato realizzato.

Fig. 5 Scala LOD

In sintesi, LOG, LOI e LOD sono concetti fondamentali nel contesto della gestione delle informazioni e dell'integrazione delle informazioni nel modello (BIM). Assicurare la corretta gestione di questi aspetti è cruciale per garantire la qualità e l'affidabilità dei modelli informativi e per supportare decisioni informate durante tutte le fasi del processo progettuale.

Differenze nel sistema LOD americano, inglese e italiano

Il sistema dei Level of Development (LOD) americano è articolato in cinque stadi progressivamente dettagliati, identificati in una scala numerica espressa in centinaia dal LOD 100 al LOD 500: questi stadi definiscono il livello di completezza a cui è stato sviluppato un elemento del modello nel contesto del Building Information Modeling. Ogni livello include tutte le caratteristiche del livello precedente, con il LOD 200 che introduce attributi informativi e il LOD 300 che aggiunge ulteriori dettagli. A partire dal LOD 200, ogni livello si divide in due parti: attributi geometrici e non geometrici. Questa struttura mira a garantire la progressiva quantità, qualità e affidabilità delle informazioni contenute nel modello BIM secondo le specifiche stabilite dall'AIA (American Institute of Architects).

Il sistema dei Level of Definition (LOD) nel Regno Unito si basa sulla norma PAS 1192-2, che definisce il Livello di Definizione in quattro differenti livelli numerici che vanno da 2 a 5. Ogni livello di definizione comprende sia il Level of Model Detail (Livello di Dettaglio del modello) che il Level of Information Detail (Livello di Dettaglio delle Informazioni). Questi livelli definiscono la descrizione grafica e non grafica dei modelli in ciascuna fase progettuale. Quindi, il livello di dettaglio del modello fornisce una descrizione dettagliata del contenuto grafico, mentre il livello di dettaglio delle informazioni descrive il contenuto non grafico dei modelli.

Nel contesto del LOD UK, i livelli si suddividono in: LOD 2: Concept stage; LOD 3: Developed design; LOD 4: Technical; LOD 5: Construction; questi livelli sono legati alle fasi di sviluppo del progetto e definiscono in dettaglio i requisiti e le caratteristiche degli elementi del modello informativo.

Il sistema dei Level of Development (LOD) italiano si articola secondo la norma UNI 11337:2017, che definisce il Livello di sviluppo dell'oggetto suddiviso in Livello di sviluppo degli Oggetti per gli attributi geometrici (LOG) e Livello di sviluppo degli Oggetti per gli attributi informativi (LOI). La scala dei LOD italiani è codificata in lettere dalla A alla G per evitare confusioni con i sistemi statunitense e britannico. Questa scala prevede possibili step intermedi come ad esempio LOD C.01, LOD C.02, a discrezione del committente. Un aspetto distintivo del sistema italiano è che il LOD di un elemento non corrisponde necessariamente a una fase specifica del processo progettuale (Sattanino, 2017).

Level of Information Need

La norma UNI 19650 introduce invece il concetto di "Level of Information Need" (LOIN), che punta a ottimizzare il processo BIM attraverso quattro aspetti fondamentali:

1. Personalizzazione delle informazioni: il concetto di LOIN riconosce che diverse parti coinvolte nel progetto possono avere esigenze diverse in termini di informazioni. Ad esempio, un architetto potrebbe avere bisogno di informazioni dettagliate sulla geometria e sulle finiture degli elementi architettonici, mentre un ingegnere strutturale potrebbe avere bisogno di dati riguardanti i carichi e le proprietà dei materiali. Determinare il LOIN consente quindi di personalizzare le informazioni fornite a ciascun attore coinvolto per soddisfare le sue esigenze specifiche;
2. Pianificazione del processo: definire il LOIN implica anche pianificare quando e quali informazioni saranno necessarie durante il processo progettuale. Ad esempio, le informazioni dettagliate sulle specifiche dei materiali possono essere necessarie durante la fase di progettazione, mentre le informazioni relative alla manutenzione e all'operatività possono essere richieste durante la fase di gestione del ciclo di vita dell'edificio. Identificare in anticipo le esigenze di informazione aiuta a garantire che queste siano disponibili quando necessario e che siano pertinenti al contesto specifico;
3. Ottimizzazione delle risorse: definendo il LOIN in modo appropriato, è possibile ottimizzare l'allocazione delle risorse. Ad esempio, concentrare gli sforzi sulla raccolta e sulla gestione delle informazioni che sono realmente necessarie per soddisfare gli obiettivi del progetto e le esigenze degli attori coinvolti, riducendo così gli sprechi di tempo e risorse;
4. Comunicazione efficace: Il concetto di LOIN facilita la comunicazione tra le parti coinvolte nel progetto. Definendo chiaramente quali informazioni sono necessarie e a quali scopi, si riduce il rischio di fraintendimenti o di fornire informazioni superflue. Ciò migliora l'efficienza del flusso di informazioni e contribuisce a una migliore collaborazione tra gli attori del progetto.

In sintesi, il concetto di LOIN svolge un ruolo chiave nell'assicurare che le informazioni all'interno di un progetto BIM siano fornite in modo mirato e appropriato alle esigenze

specifiche delle parti coinvolte, contribuendo così a una gestione più efficiente ed efficace dei dati di costruzione e ottimizzando l'uso delle risorse a disposizione.

4.3. Requisiti del modello

Indipendentemente dal software utilizzato e dall'abilità dell'operatore, la modellazione e la parametrizzazione di edifici, specialmente se complessi, richiede tempo e conoscenze tecniche: nell'ottica di ottimizzare lo sforzo richiesto per raggiungere i risultati desiderati, modellare tutti gli elementi di un edificio e caratterizzarli completamente attraverso parametri è controproducente, sia dal punto di vista temporale sia per il livello di specializzazione richiesto, oltre che per i limiti di memoria dell'hardware utilizzato.

Appare perciò chiara la necessità di definire, a seconda degli obiettivi di progetto e delle richieste del committente, i requisiti del modello BIM, necessari o desiderati, specifici per ogni disciplina inserita, in modo da restituire diversi livelli e tipologie di informazione: questo risulta essere un passaggio chiave all'interno del processo sviluppato, in quanto condiziona non solo gli elementi modellati ma anche, e soprattutto, tutte le informazioni da acquisire prima di impostare il lavoro e il livello di approfondimento richiesto agli elaborati (CAD, cartacei, Nuvola di Punti) relativi allo stato di fatto.

Partendo dalle definizioni di LOD, LOG e LOI, è stata individuata una dipendenza tra obiettivi, categorie di modellazione richieste e informazioni associate a ciascuna categoria: il rapporto è di tipo incrementale e, partendo da un modello elementare per la semplice analisi spaziale dell'edificio e aggiungendo categorie di modellazione o aumentando la quantità di informazioni estraibili, costruisce una replica degli ambienti da ottimizzare in funzione della tipologia di analisi da condurre.

I requisiti individuabili si distinguono in tre categorie:

- **Requisiti geometrici**, cioè ciò che è necessario modellare;
- **Requisiti informativi da modello**, ovvero le informazioni inserite all'interno del modello attraverso specifici parametri e utilizzabili per ricavare ulteriori dati;

- **Requisiti informativi di gestione**, che racchiudono tutte le informazioni che servono a raggiungere l'ottimizzazione richiesta ma non possono essere inserite all'interno del modello senza che risultino forzate.

Requisiti geometrici e informativi da modello

Una precisa e attenta definizione dei requisiti geometrici permette di influenzare notevolmente i tempi di restituzione grafica e le competenze tecniche richieste, nonché i tempi generali di processo e il margine di errore. Portando un esempio pratico, potrebbe non essere necessario modellare gli accessi a una stanza se l'obiettivo è ottimizzare l'accensione e la temperatura dell'impianto di climatizzazione: la posizione delle aperture non è infatti una variabile che può essere modificata senza portare a un lavoro di ristrutturazione degli ambienti e la modellazione richiederebbe tempo e potrebbe comportare errori. Al contrario, se l'obiettivo è ottimizzare la disposizione di una stanza in base ai dati raccolti dai sensori, non solo è necessario modellare gli accessi ma anche la volumetria degli arredi; questi ultimi possono però essere delle masse volumetriche che ne rappresentano la posizione nello spazio e si ricorrerebbe alle immagini catturate con la nuvola di punti per una restituzione realistica e fotografica degli elementi abbozzati.

Da quest'ultimo esempio si comprende come, all'interno dello stesso modello, le diverse discipline e addirittura le diverse categorie di una stessa disciplina non è detto che abbiano lo stesso LOG: se infatti gli elementi architettonici, come pareti e arredi, devono essere modellati per gli obiettivi preposti, gli impianti possono essere inseriti solo come posizione dei terminali o come informazione legata alla room che si sta prendendo in considerazione.

Questo non significa che la parte MEP abbia un basso livello di definizione: il modello BIM contiene, infatti, anche una serie di dati non geometrici, legati agli elementi modellati tramite la compilazione di parametri specifici e attraverso i quali è possibile ottenere le informazioni necessarie all'ottimizzazione desiderata. Nell'ottica di massimizzare l'occupazione di una stanza, ad esempio, è necessario conoscere sia l'ingombro degli arredi (informazione geometrica) sia se questi siano fissi o mobili; se lo scopo del processo è ottimizzare invece la funzione degli ambienti, oltre alle caratteristiche dimensionali, servono anche informazioni relative ai vincoli di uso imposti dal committente (corridoio, sala riunione, ...), ai vincoli interni

di superfici minime e rapporti aeroilluminanti definiti nei regolamenti edilizi, all'occupazione e alla tipologia di collegamento agli impianti, senza però che questi ultimi siano effettivamente presenti nel modello.

Requisiti informativi di gestione

Vi sono poi delle informazioni, principalmente legate alla gestione amministrativa degli spazi, che non possono essere inserite all'interno del modello ma che devono essere comunque tenute in considerazione nel processo di ottimizzazione: queste possono riguardare la frequenza di utilizzo degli stessi, la necessità di alternare tra loro attività differenti e consecutive le une alle altre (pensando a un ufficio, potrebbe essere necessario prevedere la pulizia della sala conferenze prima di ogni riunione con clienti esterni o dopo ogni incontro con più di un certo numero di persone), la necessità di un determinato impianto legato a una specifica attività o la frequenza di tipologia e manutenzione.

L'integrazione di queste informazioni all'interno del modello geometrico risulterebbe difficile e forzata, possibile solo grazie alla creazione di caratteristiche ad hoc o non native del sistema scelto (ad esempio parametri di testo in Revit che non forniscono una relazione parametrica ma solo uno stato delle cose e non possono essere perciò usati come condizione di altri parametri): si dovrà quindi far riferimento a piattaforme per la gestione temporale del progetto, in grado di integrare al loro interno il modello 3D.

Workflow di definizione dei requisiti

La definizione dei requisiti del modello BIM segue perciò il seguente schema:

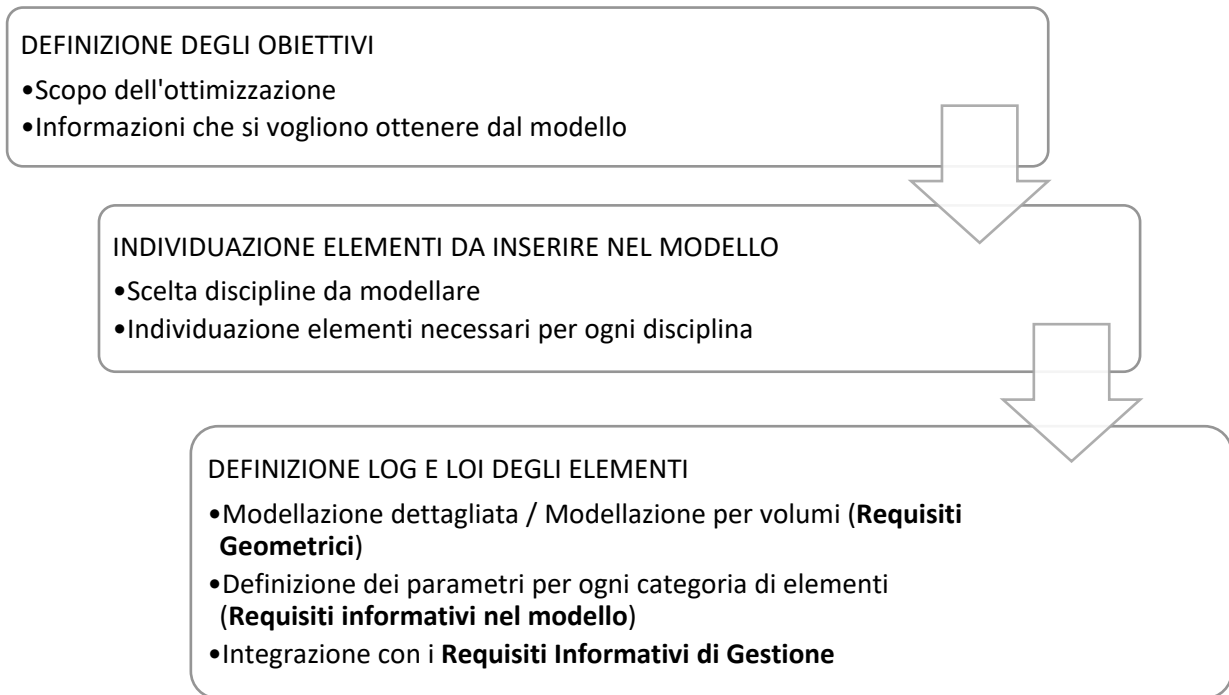


Fig. 6 Definizione dei requisiti del modello

Grazie a questo workflow è possibile definire i requisiti necessari all'ottimizzazione prevista dal progetto. La tabella 1 riporta, quindi, tre diversi scenari di ottimizzazione (ottimizzazione degli spazi, massimizzazione dell'occupazione e ottimizzazione dei consumi per climatizzazione), ognuno dei quali coinvolge diverse discipline e differenti livelli di approfondimento di ognuna, indicando contestualmente i requisiti minimi richiesti al modello BIM.

Ogni altro scenario di progetto dovrà prevedere una tabella egualmente impostata, così da riuscire a definire in partenza le caratteristiche della modellazione e, conseguentemente, il livello di precisione e approfondimento riguardante le informazioni e lo stato dello spazio preso in considerazione: per portare un esempio pratico, nel momento in cui la mia necessità è ottimizzare i consumi, dovrò conoscere la posizione degli impianti per poterli riportare nel modello e la loro tipologia, funzionamento e piano di manutenzione, così da associare correttamente modello BIM, informazioni e dati provenienti dai sensori.

OBIETTIVO	DISCIPLINA	CATEGORIA	REQUISITI GEOMETRICI	REQUISITI INFORMATIVI	
				MODELLO	GESTIONE
Ottimizzazione funzione e uso spazi	ARC	Zone	Dimensioni	- Uso - Room associate - Come è servito dagli impianti - Vincoli gestionali	- Relazione con gli altri zone e le room - Occupazione
		Room	- Dimensioni - Vincoli geometrici	- Destinazione - Impianti connessi - Vincoli gestionali	- Relazione con gli zone e le room - Occupazione - Vincoli gestionali
		Elementi architettonici (pareti, pavimenti, ...)	- Lunghezza, altezza e spessore - Posizione	-	-
	MEP	Climatizzazione	-	- Tipologia - Posizione terminali	- Programmabilità - Manutenzione
		Illuminazione	-	- Tipologia	- Programmabilità - Automazioni - Manutenzione
Massimizzazione occupazione	ARC	Room	- Dimensioni - Vincoli geometrici - Accessi	- Destinazione - Impianti connessi - Vincoli gestionali	- Relazione con gli zone e le room - Occupazione - Vincoli gestionali
		Elementi architettonici (pareti, pavimenti, serramenti, ...)	- Lunghezza, altezza e spessore - Posizione	- Tipologia - Funzione - Apribile (per serramenti) - Distanze minime	-
		Arredi	- Ingombro volumetrico	- Tipologia - Fisso/mobile - Ingombro d'uso	- Manutenzione - Utilizzo
	MEP	Climatizzazione	- Posizione terminali	- Tipologia	- Programmabilità - Manutenzione
		Illuminazione	-	- Tipologia - Posizione terminali	- Programmabilità - Automazioni - Manutenzione
		Elettrico	-	- Posizione e numero terminali - Tipologia prese	- Programmabilità - Manutenzione
Ottimizzazione consumi per climatizzazione	ARC	Zone	Dimensioni	- Uso - Room associate - Come è servito dagli impianti	- Relazione con gli altri zone e le room - Occupazione
		Room	- Dimensioni - Vincoli geometrici	- Destinazione - Impianti connessi	- Relazione con gli zone e le room - Occupazione
		Elementi architettonici	- Dimensioni - Posizione	-	-
	MEP	Climatizzazione	- Posizione terminali - Distribuzione principale	- Tipologia	

Tabella 1 - Requisiti modello BIM

Sarà poi necessario definire, a seconda delle specifiche del progetto e del software di modellazione utilizzato, i parametri che rappresentano i requisiti identificati: ad esempio in Revit, software utilizzato per il case study, le dimensioni degli ambienti saranno identificate dall'area del locale o dello spazio, la tipologia di impianto sarà determinata dalla famiglia utilizzata per modellare i condotti e disposizioni obbligate di elementi (come potrebbero essere distanza minima tra le scrivanie o la necessità di avere un blocco prese per ogni scrivania), modalità di modellazione delle famiglie o quote bloccate.

5 Sensori IoT

5.1. Stato dell'arte

I sensori IoT sono dispositivi fisici integrati con software e capacità di connessione che raccolgono e trasmettono dati su Internet: vengono utilizzati all'interno di edifici, cantieri e infrastrutture per raccogliere informazioni in tempo reale su vari parametri come temperatura, umidità, qualità dell'aria, occupazione e integrità strutturale.

L'importanza dei sensori IoT nel settore AEC risiede nella loro capacità di rivoluzionare le pratiche di costruzione tradizionali, fornendo dati preziosi per il processo decisionale, migliorando l'efficienza operativa, la sicurezza e la sostenibilità. Integrando i sensori IoT nei sistemi degli edifici, nei cantieri e nei progetti infrastrutturali, si possono quindi ottenere diversi vantaggi tra cui:

- **Monitoraggio avanzato:** i sensori IoT consentono il monitoraggio in tempo reale della salute strutturale, delle condizioni ambientali, del consumo energetico e delle prestazioni delle apparecchiature, consentendo risposte tempestive ai problemi e una manutenzione proattiva.
- **Maggiore sicurezza:** questi sensori facilitano il rilevamento di potenziali pericoli e condizioni non sicure nei cantieri o all'interno degli edifici, migliorando le misure di sicurezza complessive e riducendo al minimo i rischi per i lavoratori e gli occupanti.
- **Approfondimenti basati sui dati:** Raccogliendo e analizzando i dati dai sensori IoT, i professionisti dell'edilizia possono ottenere preziose informazioni sulle prestazioni del progetto, sull'utilizzo delle risorse e sull'efficienza operativa, portando a un processo decisionale informato e a risultati ottimizzati del progetto.
- **Efficienza energetica:** i sensori IoT aiutano a monitorare il consumo energetico, ottimizzare i sistemi HVAC e controllare l'illuminazione in base ai modelli di occupazione, portando a una maggiore efficienza energetica e a una riduzione dei costi operativi.

- Pratiche sostenibili: i sensori IoT contribuiscono alla sostenibilità ambientale monitorando l'utilizzo dell'acqua, la gestione dei rifiuti e le emissioni, promuovendo pratiche ecologiche nei progetti e nelle operazioni di costruzione.

In sintesi, i sensori IoT svolgono un ruolo cruciale nella trasformazione del settore AEC fornendo dati in tempo reale, migliorando l'efficienza operativa, garantendo la sicurezza, promuovendo la sostenibilità e guidando l'innovazione nella progettazione degli edifici.

In (Wafa'a Kassab, 2020) si esplora l'utilizzo di sensori IoT per il monitoraggio del sito, il monitoraggio delle condizioni strutturali, il monitoraggio ambientale e l'automazione degli edifici, arricchendo la comprensione dell'integrazione delle tecnologie IoT con i modelli 3D nei progetti. Inoltre, (S. Dilaksha, 2021) fa luce sul ruolo critico dell'apprendimento automatico nelle applicazioni IoT, mostrando come l'IA possa migliorare il processo decisionale e le capacità predittive basate su dati storici. Questa conoscenza può favorire la discussione sui potenziali vantaggi dell'integrazione dei sensori IoT con i modelli.

Nel contesto del settore AEC, l'Internet of Things si riferisce a un sistema in cui i dispositivi fisici sono interconnessi con sensori, software e funzionalità di connettività. L'IoT consente a questi dispositivi di raccogliere, scambiare e analizzare autonomamente i dati. All'interno del settore AEC, l'IoT svolge un ruolo fondamentale nel trasformare il modo in cui gli edifici e le infrastrutture vengono concettualizzati, costruiti e gestiti, promuovendo pratiche intelligenti, efficienti dal punto di vista energetico e sostenibili (Rane, 2023). Ciò si esplicita attraverso l'integrazione di sensori in vari sistemi dell'edificio come l'illuminazione, il riscaldamento, la ventilazione e il condizionamento dell'aria (HVAC) e i sistemi di sicurezza (Kiran Khurshid, 2023).

Integrazione dei dati dei sensori IoT con i modelli 3D

Risulta interessante esplorare i metodi e le tecniche per l'integrazione dei dati dei sensori IoT con i modelli 3D. In (Shu Tang, 2019) viene discussa l'integrazione di dispositivi IoT eterogenei con piattaforme BIM e GIS per la condivisione delle informazioni e l'analisi dei big data in tempo reale nel settore delle costruzioni: in questo caso il cloud computing svolge un ruolo chiave nell'abilitare le connessioni tra i dispositivi IoT e l'infrastruttura Internet.

In (Begi' & Galic, 2021) la ricerca si concentra sull'integrazione dei dispositivi IoT con il BIM per la gestione dei consumi, la prevenzione e la risposta agli eventi straordinari e il monitoraggio delle risorse nell'edilizia. Ad esempio, i dati IoT possono aiutare a identificare problemi come la posizione della valvola di un tubo che perde senza la necessità di un'ispezione fisica. Gli studi sottolineano l'utilizzo di modelli BIM in combinazione con i dati in tempo reale provenienti dai sensori per migliorare l'efficienza operativa e il processo decisionale.

Anche grazie all'integrazione con l'IoT, in paesi come Stati Uniti, Regno Unito, Germania, Francia, Singapore, Cina, Corea del Sud e Giappone la frequenza di adozione delle tecniche BIM da parte di imprese di costruzione e aziende del settore ha registrato un notevole aumento.

Integrazione con il Building Information Modeling: vantaggi, sfide e limitazioni

In (Jochen Teizer, 2017) viene introdotto il concetto di integrazione dei dati ambientali e di localizzazione in una piattaforma BIM basata su cloud utilizzando l'IoT; si sottolineano inoltre i vantaggi dell'integrazione dei dati in tempo reale e il potenziale per migliorare la gestione delle operazioni nel settore edile e nella gestione delle strutture. Sfruttando la tecnologia IoT e i principi di Lean Construction Management (LCM), viene sviluppato un framework e un'applicazione prototipo che dimostra la capacità di monitorare e gestire i dati dei sensori in tempo reale all'interno degli ambienti BIM.

In (Ankit Katiyar, 2021) viene presentata la piattaforma "Multi-dimensional Internet of Things enabled BIM Platform (MITBIMP)" progettata per ottenere tracciabilità e visibilità in tempo reale nei processi di costruzione prefabbricati. Questa piattaforma consente la creazione di Smart Construction Objects (SCO) che collaborano con l'IoT durante le fasi di prefabbricazione. Il sistema offre alle parti interessate l'accesso ai dati in tempo reale, facilitando un migliore processo decisionale e migliorando la condivisione delle informazioni tra i partecipanti al progetto. Inoltre, la piattaforma aiuta a monitorare lo stato del progetto, l'avanzamento, i costi in tempo reale e supporta gli utenti finali con informazioni migliorate sul progetto.

Questi esempi illustrano come l'integrazione dei dati dei sensori IoT all'interno dei flussi di lavoro BIM possa fornire un monitoraggio in tempo reale, migliorare la visualizzazione dei dati

e i processi decisionali, aumentare la trasparenza del progetto e ottimizzare le operazioni di costruzione attraverso tecnologie avanzate e piattaforme collaborative.

La combinazione delle tecnologie IoT con i progetti e i modelli BIM offre diversi vantaggi, come discusso in (Begić & Galic, 2021). Alcuni dei principali includono:

- Integrazione dei dati in tempo reale: i dispositivi IoT forniscono dati istantanei ai modelli BIM, migliorando l'accuratezza e l'affidabilità delle informazioni disponibili per i progetti.
- Aumento della produttività: l'integrazione dell'IoT con il BIM consente il monitoraggio in tempo reale delle informazioni in loco, portando a una maggiore produttività ed efficienza nella gestione delle costruzioni.
- Riduzione dei costi: consentendo la raccolta e il monitoraggio dei dati in tempo reale, l'integrazione dell'IoT con il BIM può contribuire a ridurre la durata e i costi di costruzione.
- Miglioramento della comunicazione tra le parti interessate: l'integrazione di IoT e BIM facilita un coordinamento più efficace tra gli attori coinvolti, fornendo informazioni sui dati in tempo reale durante l'intero ciclo di vita del progetto.
- Miglioramento del processo decisionale: la combinazione di IoT e BIM offre opportunità per un processo decisionale intelligente in vari aspetti come la pianificazione del progetto, il monitoraggio e la gestione della salute e della sicurezza.
- Innovazione nella gestione degli edifici: le tecnologie IoT integrate con il BIM potenziano le funzionalità degli edifici intelligenti, abilitando funzionalità come il monitoraggio ambientale, la gestione dell'energia e l'analisi del comfort per gli occupanti.

Sfruttando le funzionalità dell'IoT in combinazione con i modelli BIM, i progetti raggiungono una maggiore efficienza, una riduzione dei costi e processi decisionali migliorati basati sui dati.

Nonostante i numerosi vantaggi evidenziati, vi sono ancora diverse limitazioni all'integrazione delle tecnologie IoT con i progetti, tra cui problemi di sicurezza: i dispositivi IoT, infatti, possono essere vulnerabili alle violazioni della sicurezza, esponendo dati sensibili e mettendo a rischio la sicurezza dei progetti e dei lavoratori (M. Shahinmoghada, 2019).

Interessanti risultano anche le implicazioni relative alla privacy, a causa di conflitti di proprietà dei dati tra le parti interessate nel settore delle costruzioni, ostacolando l'adozione di soluzioni abilitate all'IoT, e alle infrastrutture insufficienti: lo sviluppo di una rete IoT efficace nei progetti

richiede un'infrastruttura robusta e una connettività affidabile, che potrebbero mancare in alcune aree (S. Dilaksha, 2021). Anche la mancanza di consapevolezza e conoscenza porta ad affrontare sfide nella comprensione e nell'implementazione di soluzioni IoT, così come la necessità di diversificare l'allocazione delle risorse, dal momento che l'integrazione delle tecnologie IoT nei progetti può richiedere investimenti significativi in attrezzature, formazione e infrastrutture, che possono essere un fattore limitante per alcune aziende.

Uno sguardo al futuro

In (Rane, 2023), vengono discusse diverse tendenze e tecnologie relative all'IoT nel settore AEC, sottolineando le potenziali applicazioni dei sensori IoT e il loro ruolo nelle costruzioni intelligenti e sostenibili: la ricerca evidenzia la rete interconnessa di dispositivi fisici integrati con sensori e software, che consente la raccolta, lo scambio e l'analisi dei dati in tempo reale. (Shu Tang, 2019) approfondisce l'integrazione dei dispositivi BIM e IoT, presentando lo stato attuale e le tendenze future. Il documento discute il potenziale dei sensori IoT e le loro applicazioni nei progetti, evidenziando i vantaggi dell'utilizzo di tecnologie digitali come BIM, IoT e analisi dei big data per la gestione e il monitoraggio dei progetti. Inoltre, in (S. Dilaksha, 2021), vengono esplorate varie applicazioni dei sensori IoT in progetti ingegneristici complessi, tra cui il miglioramento della gestione dei trasporti, il miglioramento del controllo della sicurezza nei cantieri, la gestione delle risorse umane, il monitoraggio ambientale, il monitoraggio dello stato di salute delle strutture, la gestione dei rifiuti e i benefici economici. Diverse sono quindi le tendenze e le tecnologie che modellano l'integrazione dei sensori IoT con i modelli 3D nel settore AEC, come l'analisi dei dati in tempo reale, il cloud computing, la realtà virtuale e aumentata, gli standard per l'integrazione delle informazioni e il potenziale delle applicazioni IoT nel migliorare l'efficienza, la sicurezza e la sostenibilità dei progetti.

In particolare, potenziali aree di indagine futura riguardano:

- Lo studio di tecnologie innovative: la ricerca sullo sviluppo di sistemi automatizzati, codici avanzati, calcolo efficiente, capacità di archiviazione estese, larghezza di banda di rete migliorata e protocolli di sicurezza avanzati può affrontare le sfide attuali nell'integrazione di deep learning e gemelli digitali per l'edilizia 4.0 (Mergen Kor, 2021).
- Il miglioramento dell'efficienza del trasferimento dei dati: la ricerca futura può concentrarsi sul superamento dei problemi di perdita di dati durante il processo di trasferimento

all'interno di tecnologie integrate, affrontando le preoccupazioni relative all'incompatibilità del software e al degrado dei dati, per migliorare l'integrità dei dati e lo scambio di informazioni in tempo reale.

- La correlazione dei dati in tempo reale: l'esplorazione di metodologie per migliorare la correlazione tra i modelli di simulazione per l'ambiente costruito con i dati ambientali in tempo reale può consentire una visualizzazione accurata, una previsione e un supporto decisionale per i progetti.
- Modelli ibridi ad autoapprendimento: indagare il potenziale impatto dell'integrazione di gemelli digitali, deep learning e Internet of Things per creare modelli ibridi ad autoapprendimento con capacità cognitive proattive può guidare i progressi nei processi di pianificazione, progettazione e costruzione.

Osservazioni

L'integrazione dei sensori IoT con i modelli 3D nel settore AEC ha un enorme potenziale per migliorare l'efficienza, la sicurezza e la sostenibilità dei progetti. Attualmente, i dispositivi IoT consentono la raccolta di dati in tempo reale, permettendo il monitoraggio dell'avanzamento della costruzione, del movimento delle attrezzature e dell'utilizzo delle risorse, come evidenziato in (Shu Tang, 2019).

Questi dati in tempo reale possono essere incorporati nei Building Information Models per visualizzare i percorsi in movimento, monitorare lo stato delle risorse, tenere traccia del comportamento del lavoro e migliorare la comunicazione e la collaborazione nei cantieri. Inoltre, l'uso di dispositivi IoT combinati con il BIM consente il monitoraggio delle prestazioni e dell'avanzamento della costruzione, facilitando l'acquisizione dei dati sulle prestazioni effettive, sullo stato del progetto, sulle attività di costruzione e sulle informazioni sul progetto in tempo reale. Sensori come RFID (Radio Frequency Identification) e GPS possono raccogliere dati per il monitoraggio dei progressi e il controllo della qualità, mostrando il potenziale per migliorare i processi di costruzione attraverso l'integrazione IoT-BIM.

Guardando al futuro, i progressi nella tecnologia dei sensori IoT e nell'analisi dei dati consentiranno probabilmente un'integrazione ancora più sofisticata con i modelli 3D nel settore AEC. L'analisi dei big data in tempo reale basata sul cloud computing può migliorare i

processi decisionali, automatizzare il monitoraggio e incrementare l'efficienza operativa; inoltre, le potenziali applicazioni dell'integrazione IoT-BIM si estendono ad aree come la gestione dei consumi, la risposta ai disastri, il monitoraggio della salute e della sicurezza.

Per progredire ulteriormente in questo campo, la ricerca potrebbe concentrarsi sull'affrontare le attuali limitazioni, come le sfide di interoperabilità, le discrepanze nella struttura dei dati e la necessità di processi semplificati e dati affidabili dei sensori nell'integrazione IoT-BIM. Le soluzioni di analisi dei big data basate sul cloud potrebbero offrire informazioni in tempo reale e supporto decisionale, migliorando l'efficienza e l'efficacia dei cantieri intelligenti; inoltre, innovando e perfezionando continuamente l'integrazione dei sensori IoT con i modelli 3D, il settore AEC può ottenere progressi significativi nella gestione dei progetti, nella sostenibilità e nelle prestazioni complessive.

5.2. Sensori IoT e Case Study

Il presente elaborato non affronta l'integrazione tra modello BIM nell'ambito del case study; nonostante ciò, all'interno dell'edificio preso in considerazione sono installati diversi sensori che raccolgono continuamente dati. Nel campus sono presenti:

- Misuratori di temperatura (uno ogni stanza), che registrano una misurazione su base oraria della temperatura;
- Misuratori di portata della ventilazione;
- Diversi sensori IoT, installati all'interno di un progetto dipartimentale di analisi della qualità dell'aria integrata (QAI) del Campus:
 - 31 sensori di temperatura, umidità, pressione, illuminazione e CO₂, marca Wuerfeli, collegati a wi-fi e alimentati via usb-c; raccolgono i dati dell'ambiente di riferimento ogni minuto;



Fig. 7 Sensori IoT Wuerfeli

- 4 sensori a batteria per il controllo di temperatura, umidità e CO₂, modello Testo IAQ 160, che registrano i dati ogni 15 minuti;



Fig. 8 Sensori Testo

- 6-7 sensori della Ahlborn per riuscire a calibrare i modelli precedentemente descritti e avere un riferimento terzo per confrontare i dati raccolti e verificarne l'attendibilità;



Fig. 9 Sensori Ahlborn

- Un prototipo di sensore più complesso, contenente microfoni, PIR (Rilevatore di Presenza), doppi sensori di Temperatura (T), Umidità Relativa (UR) e CO₂, lux e videocamera IR.

I sensori sono stati installati in locali strategici o critici del campus, permettendo così di svolgere analisi più approfondite rispetto al monitoraggio standard dei parametri ambientali. I dati registrati sono poi raccolti, filtrati e visualizzati attraverso una piattaforma online che permette di evidenziarne l'andamento secondo intervalli strategici (media oraria, giornaliera o mensile).



Fig. 10 Visualizzazione dati raccolti da sensori di CO₂

Grazie ai dati raccolti e filtrati è possibile estrarre informazioni utili all'ottimizzazione degli spazi: analizzando la curva di salita della CO₂, ad esempio, si può capire con quale frequenza e in quali momenti della giornata un ambiente è occupato (funzionalità migliorabile con una combinazione di parametri, come ad esempio accelerometri, fonometri e simile) mentre analizzando l'andamento della temperatura si possono trarre informazioni rispetto all'efficienza degli impianti installati.

L'integrazione fra dati raccolti e modello, attraverso la definizione di algoritmi di previsione basati sulle informazioni acquisite, è la base per la creazione di un Digital Twin Predittivo (Livello 2), in grado di simulare realisticamente il comportamento dell'edificio nel futuro e di prendere dunque delle decisioni efficaci.

6 Digital Twin

Nell'industria AEC, i Digital Twin rappresentano un approccio innovativo alla progettazione, costruzione e gestione di edifici e infrastrutture. Queste repliche digitali consistono in due componenti principali: una rappresentazione fisica della struttura o del sistema e uno strato digitale che comprende dati provenienti da varie fonti come sensori, modelli BIM e dispositivi IoT. Integrati con capacità analitiche e di simulazione, i Digital Twin consentono la modellazione del comportamento del mondo reale, facilitando la manutenzione predittiva, l'analisi dell'efficienza energetica e altro ancora.

Nella fase di progettazione, architetti e ingegneri sfruttano i Digital Twin per visualizzare e perfezionare i progetti prima dell'inizio della costruzione, ottenendo così strutture più efficienti e ottimizzate; durante la costruzione, i Digital Twin aiutano nella pianificazione, nell'allocazione delle risorse e nel monitoraggio dei progressi, mitigando ritardi e costi eccessivi; infine durante la vita operativa, offrono una visione in tempo reale delle prestazioni degli edifici, supportando la manutenzione predittiva e gli sforzi di ottimizzazione energetica.

Su scala più ampia, i Digital Twin possono simulare intere città, aiutando i pianificatori urbani a prendere decisioni informate su trasporti, sviluppo infrastrutturale e iniziative di sostenibilità.

I vantaggi dei Digital Twin sono molteplici, tra cui una miglior collaborazione tra gli attori coinvolti, risparmi di tempo e denaro e una maggiore sostenibilità attraverso l'analisi del consumo energetico e la riduzione dell'impronta di carbonio; tuttavia, sfide come l'integrazione dei dati, la privacy, la sicurezza e la scalabilità devono essere affrontate per sfruttarne appieno il potenziale.

6.1. Stato dell'arte

L'emergere di tecnologie come il BIM ha rivoluzionato le pratiche AEC, consentendo l'integrazione senza soluzione di continuità di dimensioni informative per un miglioramento dell'efficienza e dell'efficacia durante i cicli di vita dei processi progettuali (Ozturk, 2021): i

Digital Twin, definiti come rappresentazioni digitali di asset o sistemi fisici, sono repliche dinamiche e aggiornate che riuniscono dati di progettazione, costruzione e operativi. Consentono la modellazione e la previsione del comportamento di entità fisiche, facilitando calcoli, simulazioni e decisioni informate sincronizzando i dati tra il mondo fisico e quello digitale. L'industria AEC riconosce le potenziali applicazioni dei Digital Twin, in particolare nella gestione degli asset durante la fase operativa dell'intero ciclo di vita. I Digital Twin sfruttano dati sui componenti, prestazioni operative e programmi di manutenzione per prevedere e gestire guasti, definire le politiche di manutenzione e prevenire potenziali guasti meccanici. Inoltre, tecnologie come la Realtà Virtuale (VR) e la Realtà Aumentata (AR) vengono sempre più incorporate nelle applicazioni dei Digital Twin, fornendo esperienze interattive e coinvolgenti per gli utenti nell'ambiente costruito, consentendo la visualizzazione dei dati, l'interazione e il controllo dei componenti secondo le necessità.

In conclusione, l'industria AEC beneficia significativamente dall'implementazione dei Digital Twin, che consentono il monitoraggio in tempo reale, le previsioni, le simulazioni e i processi ottimizzati per migliorare le prestazioni e la produttività attraverso decisioni efficaci in tempo reale.

Il concetto di Digital Twin nell'industria AEC è evoluto da modelli digitali semplici a sistemi più avanzati e interconnessi. Inizialmente, venivano fatte distinzioni tra modelli digitali, specchi digitali e Digital Twin in base al livello di scambio di dati e interazione tra le controparti fisiche e digitali. I modelli digitali erano versioni informatiche di base di oggetti fisici senza scambio automatico di dati (Alibrandi, 2022). Gli specchi digitali consentivano un flusso di dati unidirezionale dal fisico al digitale, il che significava che le modifiche nel modello fisico influenzavano il modello digitale. D'altra parte, i Digital Twin consentivano un flusso di dati bidirezionale tra i gemelli, dove le modifiche nel modello fisico influenzavano il modello digitale e viceversa. Nelle applicazioni all'interno del settore delle costruzioni, idealmente, i Digital Twin vengono implementati durante la fase di progettazione e durante l'intero ciclo di vita dell'asset, concentrandosi sulla previsione della sicurezza delle strutture e sulla gestione dell'asset; facilitano la progettazione di opere sostenibili e resilienti fin dalle prime fasi del processo, garantendo che gli edifici e le infrastrutture possano risultare efficaci contro i rischi, riducendo il tempo di recupero e l'impatto ambientale.

(Valerian Vanessa Tuhaise, 2023) discute dell'evoluzione dei Digital Twin, delle loro applicazioni nella produzione, nell'aviazione, nella sanità, così come del loro potenziale per l'industria delle costruzioni. Le capacità dei Digital Twin accoppiate ai progressi nelle tecnologie smart emergenti hanno generato interesse per la loro implementazione nel settore delle costruzioni, evidenziando il loro potenziale impatto su vari aspetti all'interno del settore.

Sfide all'implementazione

Le sfide affrontate nello sviluppo e nell'adozione dei Digital Twin nell'industria AEC (Muhammad Shahzad, 2022) sono molteplici e evidenziano problematicità in diversi settori chiave:

- **Problemi di Personalizzazione e Interoperabilità:** gli strumenti digitali esistenti richiedono spesso personalizzazioni significative per adattarsi alle esigenze specifiche dei progetti, con la richiesta di livelli di interoperabilità ad hoc dei dati tra i diversi sistemi;
- **Complessità e Variazione dei Progetti:** la natura complessa dei progetti AEC e la varietà dei tipi di edifici richiedono approcci flessibili e adattabili per l'implementazione dei Digital Twin, richiedendo ulteriori progressi nella standardizzazione e nell'automazione dei processi.
- **Esigenze di Condivisione dei Dati:** la condivisione dei dati tra i diversi attori del progetto, compresi architetti, ingegneri, appaltatori e proprietari, richiede un'infrastruttura tecnologica e un framework di gestione dei dati robusti e sicuri.
- **Privacy e Sicurezza:** la protezione dei dati personali e sensibili, insieme alla sicurezza delle informazioni e alla protezione da minacce cibernetiche, è una preoccupazione sensibile nell'ambito dell'implementazione dei Digital Twin.
- **Scalabilità e Gestione del Cambiamento:** l'adozione su vasta scala dei Digital Twin richiede una gestione efficace nel cambiamento degli standard organizzativi, insieme a una strategia di scalabilità per supportare la crescita e l'espansione dei progetti.
- **Investimenti e Risorse:** la realizzazione di Digital Twin efficaci richiede investimenti significativi in risorse umane, tecnologiche e finanziarie, con le difficoltà da superare nell'assegnazione delle risorse e nell'ottenimento di un ritorno sicuro sull'investimento.

Affrontare queste sfide richiede un approccio collaborativo tra tutti gli attori dell'industria AEC, insieme a una visione strategica a lungo termine per guidare l'adozione e l'implementazione dei Digital Twin: attraverso l'identificazione e la mitigazione delle problematiche chiave, l'industria AEC può massimizzare il valore dei Digital Twin e sfruttare appieno il loro potenziale.

In conclusione, i Digital Twin rappresentano una tecnologia trasformativa nell'industria dell'Architettura, dell'Ingegneria e della Costruzione (AEC), offrendo un'ampia gamma di applicazioni che migliorano l'efficienza operativa, ottimizzano le prestazioni degli asset e migliorano i processi decisionali lungo l'intero ciclo di vita dei processi progettuali. Attraverso la creazione di repliche digitali dinamiche degli asset fisici, i Digital Twin consentono il monitoraggio in tempo reale, la manutenzione predittiva, la simulazione di scenari operativi e l'ottimizzazione delle prestazioni degli edifici. Tuttavia, l'adozione efficace dei Digital Twin richiede di affrontare di diverse sfide, con un approccio collaborativo e strategico da parte di tutti gli attori dell'industria AEC, insieme a una visione a lungo termine per massimizzare il valore dei Digital Twin e sfruttarne appieno il potenziale innovativo.

6.2. Tipologie di Digital Twin

Nei progetti AEC, i Digital Twin possono essere suddivisi a seconda dei livelli di complessità e dettaglio, noti come livelli di maturità del Digital Twin. Spesso associati al concetto di "Digital Twin 4.0", vanno dal livello più basilare, che fornisce una rappresentazione statica delle informazioni, fino al livello più avanzato, che integra dati in tempo reale e abilita l'automazione e la simulazione avanzata. Di seguito sono descritti i principali livelli di Digital Twin nel settore AEC:

- **Livello 0 - Rappresentazione Statica:** il Digital Twin è una semplice rappresentazione digitale dell'edificio o dell'infrastruttura. Include informazioni statiche come i disegni CAD, i modelli BIM e la documentazione tecnica. Tali informazioni sono principalmente utilizzate per scopi di progettazione e raccolta documentale, senza possibilità di interazione o aggiornamento in tempo reale;
- **Livello 1 - Monitoraggio e Visualizzazione:** il Digital Twin è in grado di raccogliere e visualizzare dati in tempo reale sull'ambiente costruito. Questi dati possono includere informazioni sull'utilizzo degli spazi, i consumi energetici, la qualità dell'aria e altri

parametri rilevanti; il Digital Twin fornisce una panoramica delle prestazioni dell'edificio o dell'infrastruttura, ma non supporta l'analisi avanzata o l'automazione dei processi;

- **Livello 2 - Analisi e Ottimizzazione:** il Digital Twin è in grado di eseguire analisi avanzate e simulazioni per ottimizzare le prestazioni dell'edificio o dell'infrastruttura; utilizza dati storici e in tempo reale per identificare potenziali inefficienze e suggerire miglioramenti. Ad esempio, può essere utilizzato per ottimizzare il layout degli spazi, ridurre i consumi energetici o implementare la manutenzione preventiva;
- **Livello 3 - Automazione e Controllo:** questo è il livello più avanzato di Digital Twin, in cui il sistema è in grado di eseguire azioni automatiche in risposta ai dati raccolti e alle analisi effettuate; un Digital Twin di livello 3 potrebbe regolare automaticamente i sistemi HVAC in base alle condizioni ambientali interne ed esterne, migliorando l'efficienza energetica e il comfort degli occupanti.

Ogni livello di Digital Twin porta con sé vantaggi e sfide specifiche, e la scelta del livello appropriato dipende dalle esigenze e dalle risorse disponibili per il progetto.

Digital Twin Predittivo (Livello 2)

Il processo sviluppato, di interesse per questa tesi, si propone di realizzare un Digital Twin per l'analisi e l'ottimizzazione di edifici esistenti: a questo livello, il Digital Twin nel settore AEC si spinge oltre la semplice raccolta di dati in tempo reale, concentrandosi sulla capacità di analizzare e interpretare queste informazioni per ottenere insight significativi. Utilizzando algoritmi avanzati di analisi dei dati e modelli di simulazione, il Digital Twin può esaminare i flussi di dati provenienti da sensori distribuiti all'interno dell'edificio o dell'infrastruttura: ciò consente di identificare tendenze, anomalie e correlazioni che potrebbero non essere evidenti a una prima analisi, consentendo agli stakeholder di prendere decisioni informate e proattive.

Un aspetto cruciale del livello 2 è la capacità di ottimizzare le prestazioni dell'edificio o dell'infrastruttura attraverso l'analisi avanzata dei dati; questo può includere l'ottimizzazione dei flussi di lavoro, la massimizzazione dell'utilizzo degli spazi, la riduzione dei consumi energetici e la previsione dei bisogni di manutenzione. Ad esempio, il Digital Twin potrebbe analizzare i dati storici sull'utilizzo degli spazi per identificare aree sottoutilizzate o sovraffollate, suggerendo modifiche al layout per migliorare l'efficienza complessiva.

Inoltre, il Digital Twin Predittivo può essere utilizzato per simulare scenari alternativi e valutare l'impatto potenziale di decisioni progettuali o di gestione, consentendo agli stakeholder di esplorare diverse opzioni e valutare i loro rispettivi benefici e conseguenze prima di implementarle nella pratica: è possibile, ad esempio, simulare l'installazione di nuove tecnologie o impianti energetici per valutarne l'efficacia e l'impatto sulle prestazioni globali dell'edificio.

6.3. Piattaforme per il Digital Twin

Sul mercato sono presenti diversi software per l'implementazione di Digital Twin (Farhadi, 2024), tra cui:

- **aPriori Digital Manufacturing Simulation Software:** La piattaforma rafforza gli investimenti nel digital thread dei produttori, consentendo un valore aziendale scalabile, una maggiore agilità e mitigazione del rischio. Attraverso la Manufacturing Insights Platform di aPriori, viene simulata ogni fase del processo di fabbricazione del prodotto, comprese le operazioni primarie e secondarie: questa simulazione genera dati vitali, aiutando i team a identificare e risolvere i problemi di progettazione o approvvigionamento che potrebbero ostacolare la produzione o gonfiare i costi. Le fabbriche digitali della piattaforma generano dati di produzione completi, consentendo agli ingegneri di progettazione del prodotto, agli ingegneri dei costi e agli esperti di approvvigionamento di prendere decisioni informate ogni giorno. Il software digital twin crea un thread digitale collegando virtualmente tutti gli aspetti del processo di produzione, consentendo approfondimenti critici da un semplice caricamento del modello CAD.
- **XMPRO:** La piattaforma di sviluppo delle applicazioni XMPRO consente agli ingegneri e agli esperti in materia di creare applicazioni avanzate che intrecciano il rilevamento degli eventi, l'analisi in tempo reale all'avanguardia e le raccomandazioni attuabili. Che si tratti di sviluppare software di Digital Twin, app di event intelligence o processi aziendali digitali, XMPRO facilita l'integrazione di tecnologie dirompenti nelle app, aiutando i team a prendere decisioni informate. Con la sua piattaforma no-code, XMPRO fornisce alle PMI risorse digitali per affrontare le sfide su scala più ampia attraverso applicazioni in tempo reale.



- **SAP Leonardo Internet of Things:** I servizi SAP Leonardo Internet of Things (IoT) formano una rete di oggetti fisici chiamati "cose", facilitando la raccolta e lo scambio di dati. Aiuta a stabilire un modello per le cose, le aziende e il personale di servizio all'interno di un'organizzazione e le loro relazioni interconnesse. La piattaforma offre servizi basati su REST e OData per l'archiviazione e il recupero efficiente dei dati relativi a cose, aziende e personale di servizio. In questo contesto una "cosa" rappresenta qualsiasi oggetto fisico, sia esso un'automobile, un robot o qualsiasi componente o parte, ritenuto rilevante dal punto di vista dell'utente o dell'applicazione; le aziende, chiamate anche partner commerciali, sono coinvolte nella produzione e nella manutenzione di queste cose.
- **Oracle IoT Production Monitoring Cloud:** è un'applicazione specializzata per l'Internet of Things (IoT) su misura per le fabbriche. Consente di tenere traccia delle sedi delle fabbriche e dello stato delle macchine, fornendo al contempo informazioni in tempo reale sul loro utilizzo. Questa visibilità aiuta a identificare, diagnosticare e prevedere i problemi di produzione, aumentando in ultima analisi i tempi di attività della fabbrica. Inoltre, facilita la pianificazione proattiva della manutenzione per ridurre al minimo le interruzioni delle operazioni quotidiane. Questo servizio offre un monitoraggio in tempo reale dell'officina, consentendo una comunicazione senza soluzione di continuità tra i sistemi di produzione e l'interazione tra i sistemi e gli operatori umani. Questa collaborazione migliora l'efficienza produttiva ed eleva il processo decisionale, ottimizzando le prestazioni complessive della produzione.
- **Tecnomatix:** La suite Tecnomatix comprende un robusto software di digital twin progettato per semplificare e ottimizzare i processi di produzione, con due potenti componenti: Process Simulate e Plant Simulation. Process Simulate consente di pianificare, simulare e convalidare le attività umane, i processi robotici e l'automazione durante l'intero ciclo di vita dello sviluppo del prodotto. Dalla creazione del concetto all'ingegneria, alla messa in servizio, alla produzione e al miglioramento continuo, questo strumento garantisce una convalida completa. D'altra parte, i modelli di simulazione dell'impianto simulano, visualizzano e analizzano i sistemi di produzione e i processi logistici. Ottimizza il flusso di materiali e l'utilizzo delle risorse attraverso vari livelli di pianificazione dell'impianto, che abbracciano strutture globali, impianti locali e linee di produzione specifiche.

Autodesk Tandem

Autodesk Tandem è una piattaforma tecnologica basata sul cloud per i gemelli digitali, presentata in anteprima all'Autodesk University nel 2020 e lanciata di recente (Day, 2021). Questa tecnologia consente di creare modelli di riferimento a partire dai dati di progettazione, costruzione e servizio, che possono fungere da dashboard e database per asset che necessitano di monitoraggio o manutenzione. Tandem è principalmente rivolto a progetti di costruzione nuovi realizzati utilizzando l'applicazione di progettazione Revit di Autodesk. Lo sviluppo di Tandem è iniziato nel febbraio 2020 e è derivato da discussioni sulla continuità dei dati nel ciclo di vita dell'architettura, dell'ingegneria e della costruzione tra il CEO di Autodesk Andrew Anagnost, il team di leadership AEC e Bob Bray, ora direttore senior e direttore generale di Autodesk Tandem.

Il funzionamento di Autodesk Tandem si basa su una piattaforma tecnologica basata su cloud per i gemelli digitali. La piattaforma consente di creare modelli di riferimento a partire dai dati di progettazione, costruzione e servizio, i quali fungono da pannelli di controllo e database per i beni che necessitano di monitoraggio o manutenzione. Il concetto di "gemelli digitali" si estende dai nuovi edifici alle strutture esistenti, inclusi ponti, strade e città intere: questi modelli possono anche essere collegati a sensori remoti per feedback di dati operativi in tempo reale.

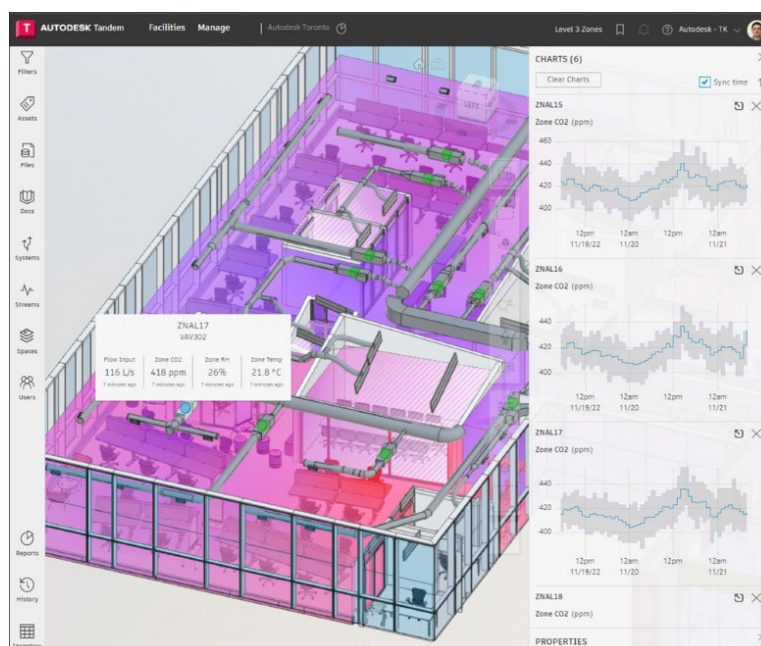


Fig. 11 Interfaccia Autodesk Tandem

Per quanto riguarda la struttura dati, Autodesk Tandem si basa su un visualizzatore Forge modificato, completamente basato su cloud, con un nuovo database incentrato su modelli asset-centrici che vengono trasmessi in streaming ai vari utenti. Il sistema è progettato per gestire grandi quantità di dati in modo rapido ed efficiente, consentendo anche la modifica dei metadati collegati ai componenti, mantenendo un'intera cronologia delle modifiche. Infine, per rendere accessibili i dati in modo efficace, il team di Tandem ha sovrapposto un database a grafo tradizionale che facilita la connessione e la comprensione dei componenti correlati, come i sistemi di condotte MEP.

Questa infrastruttura avanzata consente di visualizzare in modo dinamico le performance e l'utilizzo sia storici, attuali che predittivi dei beni, rappresentando un'innovazione significativa nel settore dell'AEC.

7 Case study

Il capitolo riporta lo sviluppo del case study: questo si è concentrato sulle prime due fasi del processo (acquisizione delle informazioni e sviluppo del modello), e in particolare sull'acquisizione dei dati geometrici attraverso nuvole di punti e la possibilità di implementare un certo grado di automazione della modellazione.

Verranno presentate le diverse modalità di acquisizione e le criticità e i vantaggi associati per poi sviluppare la modellazione a partire dai dati raccolti: i diversi modelli creati saranno confrontati e analizzati, al fine di comprendere quale sia il processo più efficiente in termini di tempi e sforzo nell'implementare la modellazione.

Importante considerare che, tranne nel caso specificato, il processo è stato condotto a seguito di un approfondito studio sull'argomento e diversi anni di esperienza con diversi software BIM.

7.1. Presentazione

L'edificio scelto come caso studio è il Dipartimento Ambiente Costruzioni e Design (DACD) della Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana (SUPSI), situato a Mendrisio, nel Canton Ticino, in Via Flora Ruchat-Roncati 15, 6850 Mendrisio.

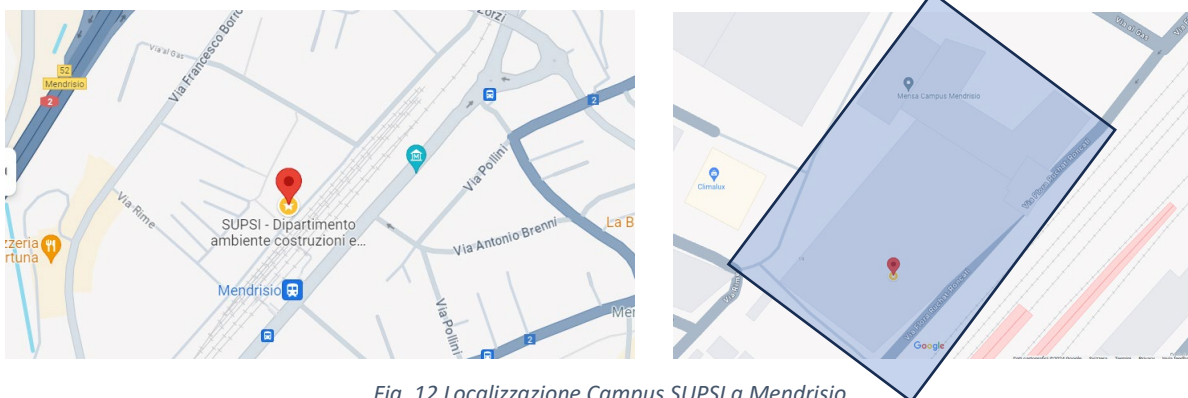


Fig. 12 Localizzazione Campus SUPSI a Mendrisio



Fig. 13 Campus SUPSI Mendrisio

Il campus si compone di un unico corpo principale, di forma rettangolare, che si sviluppa verticalmente su cinque piani fuori terra: i primi quattro, collegati da una rampa che si estende al centro del fabbricato e ne percorre tutta la lunghezza, sono adibiti a funzione di laboratori, aule per le lezioni, uffici, sale riunioni, sale break e mensa/bar (al piano terra) mentre il piano quarto, accessibile esclusivamente attraverso i corpi scale e gli ascensori, ospita unicamente uffici open space dei dipartimenti di ricerca, uffici singoli e sale riunioni.

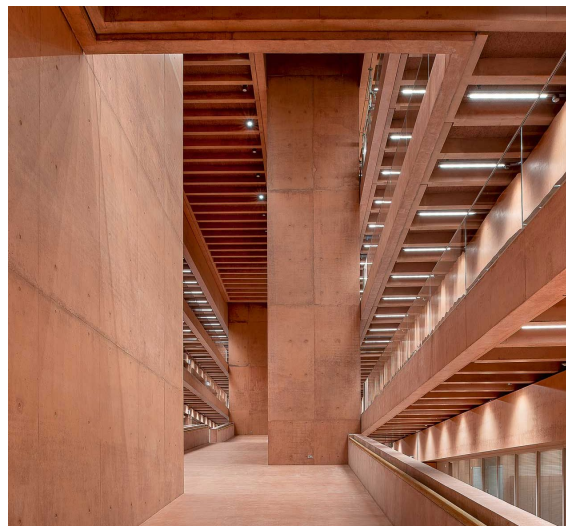


Fig. 14 Rampa centrale del campus SUPSI



Fig. 15 Campus SUPSI

La seguente immagine mostra il piano tipo del campus durante la costruzione, libero da arredi e elementi che ne impediscono la visuale, così da permettere un confronto più agevole con le nuvole di punti acquisite e i modelli sviluppati.

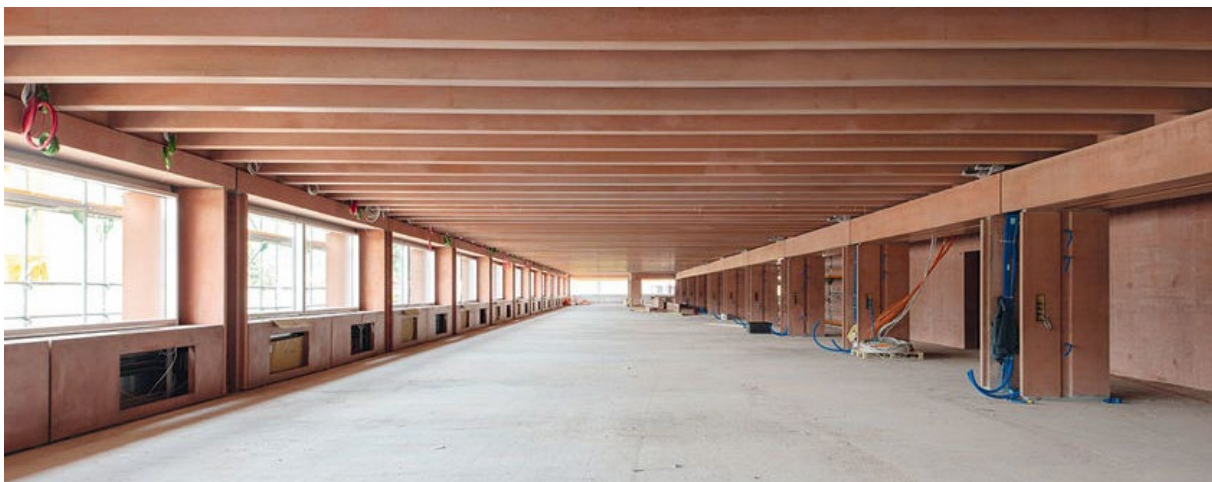


Fig. 16 Campus SUPSI ultimato ma ancora non in uso

lo sviluppo del Case Study si è svolto secondo il seguente diagramma: al fine di confrontare e dimostrare le potenzialità del metodo proposto, la modellazione è avvenuta attraverso diverse tecniche così come l'acquisizione delle informazioni sullo stato As-Is.

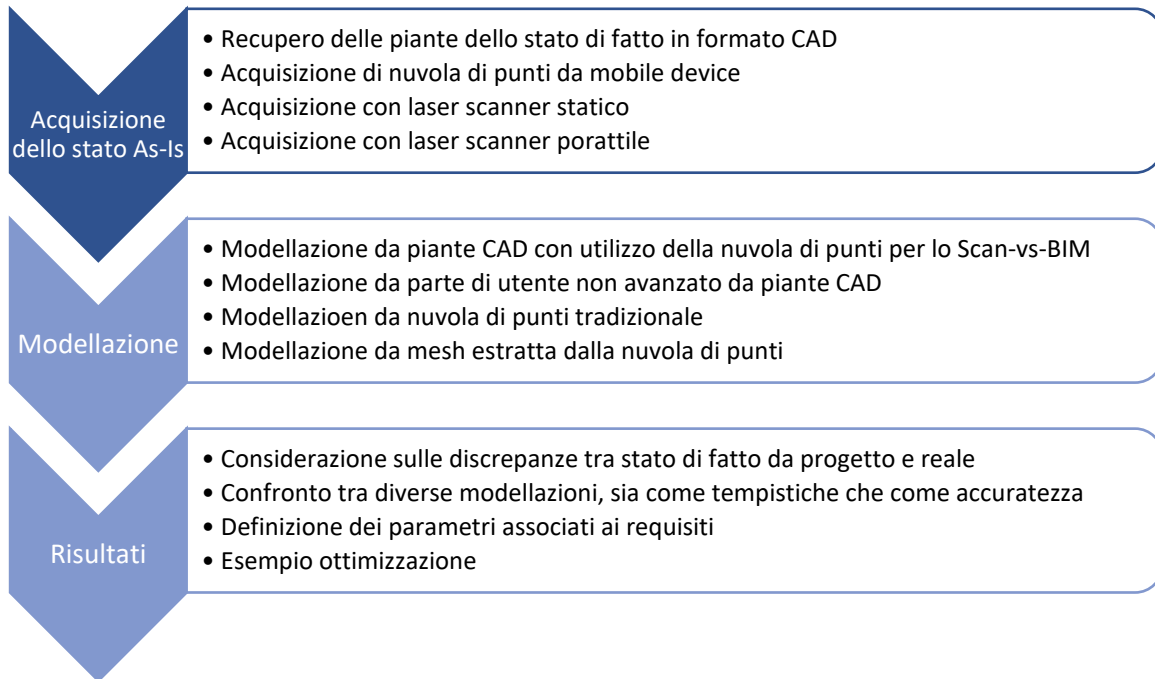


Fig. 17 Sviluppo del caso di studio

Per il case study si è deciso di sviluppare un modello con finalità di ottimizzazione uso degli spazi; i requisiti, già mostrati in tabella 1, sono stati così individuati:

OBIETTIVO	DISCIPLINA	CATEGORIA	REQUISITI GEOMETRICI	REQUISITI INFORMATIVI	
				MODELLO	GESTIONE
Ottimizzazione funzione e uso spazi	ARC	Zone	Dimensioni	- Uso - Room associate - Come è servito dagli impianti - Vincoli gestionali	- Relazione con gli altri zone e le room - Occupazione
		Room	- Dimensioni - Vincoli geometrici	- Destinazione - Impianti connessi - Vincoli gestionali	- Relazione con gli zone e le room - Occupazione - Vincoli gestionali
		Elementi architettonici (pareti, pavimenti, ...)	- Lunghezza, altezza e spessore - Posizione	-	-
	MEP	Climatizzazione	-	- Tipologia - Posizione terminali	- Programmabilità - Manutenzione
		Illuminazione	-	- Tipologia	- Programmabilità - Automazioni - Manutenzione

Tabella 2 Requisiti del modello del Case Study

7.2. Acquisizione della nuvola di punti

Vengono di seguito presentati i risultati ottenuti con diversi metodi di acquisizione per la nuvola di punti, con lo scopo di individuare il sistema più efficiente in termini di tempo, costi e abilità dell'operatore.

L'acquisizione è stata effettuata con due diverse metodologie, associate a tre diversi strumenti utilizzati: acquisizione con mobile device attraverso tecnologia LiDar e acquisizione con laser scanner, sia statico che portatile. Per ogni modalità saranno illustrati il processo di acquisizione, le procedure di registrazione e pulizia e il risultato finale.

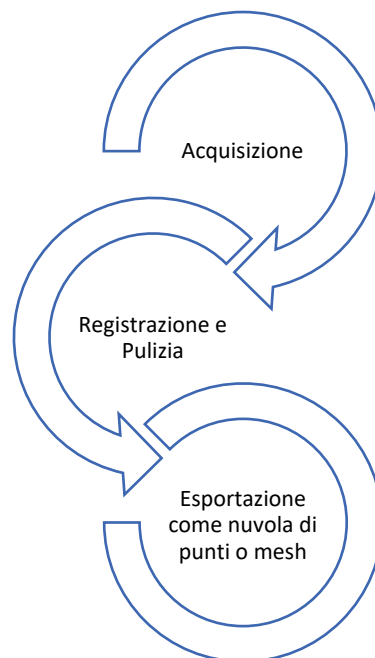


Fig. 18 Workflow acquisizione nuvole di punti

7.2.1. Acquisizione da mobile device

La prima acquisizione è stata effettuata utilizzando un iPhone 14 Pro, con tecnologia Lidar integrata, in abbinamento all'applicazione Leica Cyclone FIELD 360 e al software di registrazione Leica Cyclone REGISTER 360. L'applicazione permette di effettuare una preregistrazione dei dati, allineando e riposizionando le diverse acquisizioni, direttamente sul cellulare così da ridurre il lavoro dell'operatore per le fasi successive.

L'ambiente scelto è l'ufficio open space A4.03, situato al piano quarto: si tratta di uno spazio composto diviso in un corridoio per la circolazione verso il blocco scale e gruppi di 4 scrivanie, verso le finestre, per creare delle isole di lavoro. In particolare, ci si è concentrati sulla parte di open space assegnata al gruppo Gestione edifici del Settore Sistema Edificio dell'istituto ISAAC, verso la sala riunioni.

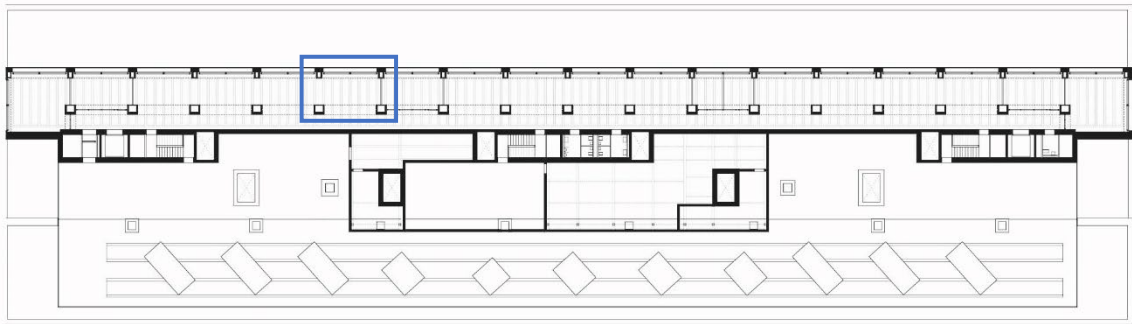


Fig. 19 Campus SUPSI, Mendrisio - 4° piano

Acquisizione e registrazione

Per ottenere un sufficiente livello di dettaglio, sono state necessarie 5 scansioni, partendo da una centrale rispetto all'ambiente considerato, girando su sé stessi fino a inquadrare lo spazio a 360°, per poi proseguire con quattro scansioni, posizionandosi agli angoli dell'ufficio: questo ha permesso di ottenere una visuale completa, riuscendo a catturare anche le porzioni coperte da arredo. Le scansioni sono state effettuate in orario di lavoro, con presenza di persone e luminosità normale: eventuali disturbi dovuti alla luce o alla presenza di oggetti sono stati successivamente eliminati in fase di pulizia della nuvola.

L'acquisizione è avvenuta tramite app Cyclone FIELD, compresa nel pacchetto software di Leica: come riportato dalle istruzioni, per ogni scansione si è proceduto a inquadrare lo spazio secondo uno schema dall'alto verso il basso e spostandosi orizzontalmente, con movimenti lenti e partendo da un punto interessante (angolo, spigolo di un mobile, ...) cosicché il software potesse facilmente rilevare punti di riferimento.

Durante la scansione, lo strumento ha spesso perso la continuità, con il risultato di dover tornare su zone già inquadrare fino a riportarsi sull'ultimo punto registrato o dover interrompere e iniziare nuovamente l'acquisizione. Tre sono i fattori principali che causano questa perdita di riferimenti:

1. Ampiezza degli spazi: il sensore dell'iPhone ha raggio limitato e, in un open space di grandi dimensioni ha difficoltà nel registrare punti lontani; questo porta a una perdita di riferimenti quando si inquadra una zona il cui fondo è molto distante dall'obiettivo;



Fig. 20 Elevata distorsione al limite della nuvola

2. Prossimità dei punti a una finestra: il disturbo aumenta notevolmente per i punti vicino ai serramenti sia per la maggiore luminosità di questi (molti sono quasi bianchi e non contengono quindi nessuna informazione) sia per la rifrazione del raggio attraverso il vetro e la percezione che i punti considerati si trovino lontanissimo;

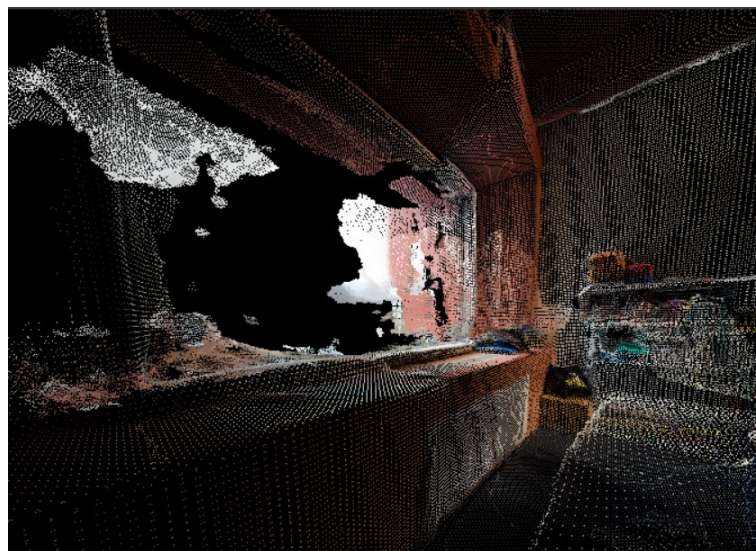


Fig. 21 Disturbo in prossimità delle finestre

3. Superfici ampie e omogenee: grandi pareti monocolori o pavimenti senza interruzioni fanno sì che lo strumento perda punti di riferimento e non riesca più a registrarne di nuovi.

Il risultato sono cinque scansioni separate in un unico file. Come mostrato in Fig. 22, una volta importate su Cyclone Register360 Plus, le nuvole acquisite non sono automaticamente

allineate e ruotate secondo lo stesso riferimento: si è deciso, infatti, di non ricorrere al pre-allineamento sull'applicazione e di effettuarlo manualmente sul software.

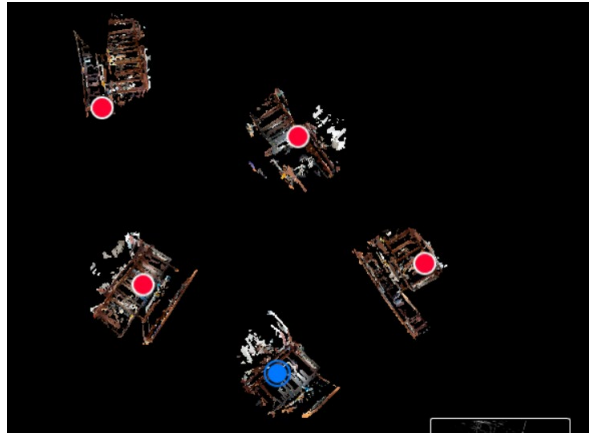
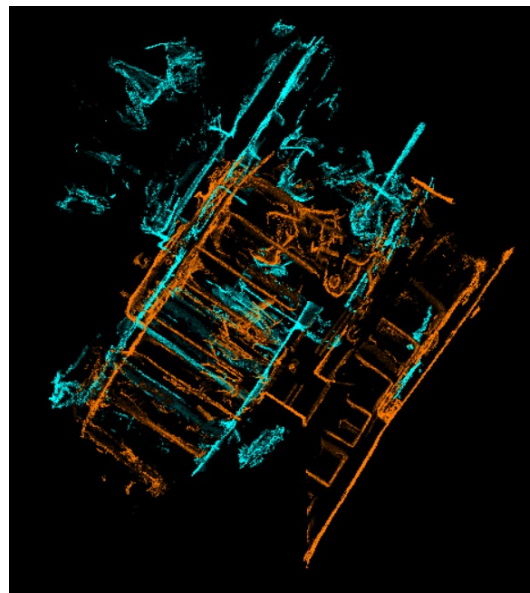
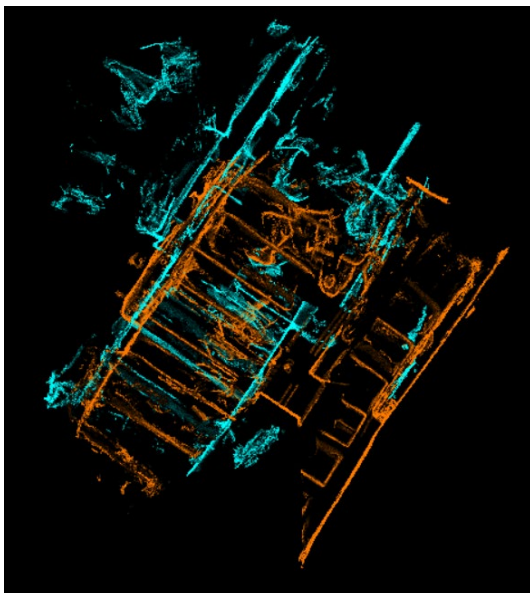


Fig. 22 Scansioni importate su Register

Selezionando a due a due i SetUp (così sono chiamate le singole acquisizioni nel software), è stato possibile allineare le diverse nuvole, ruotandole e referenziandole secondo gli stessi tre assi. Una volta completato l'allineamento manuale, il software ha effettuato un'ottimizzazione automatica, riconoscendo le superfici complanari.



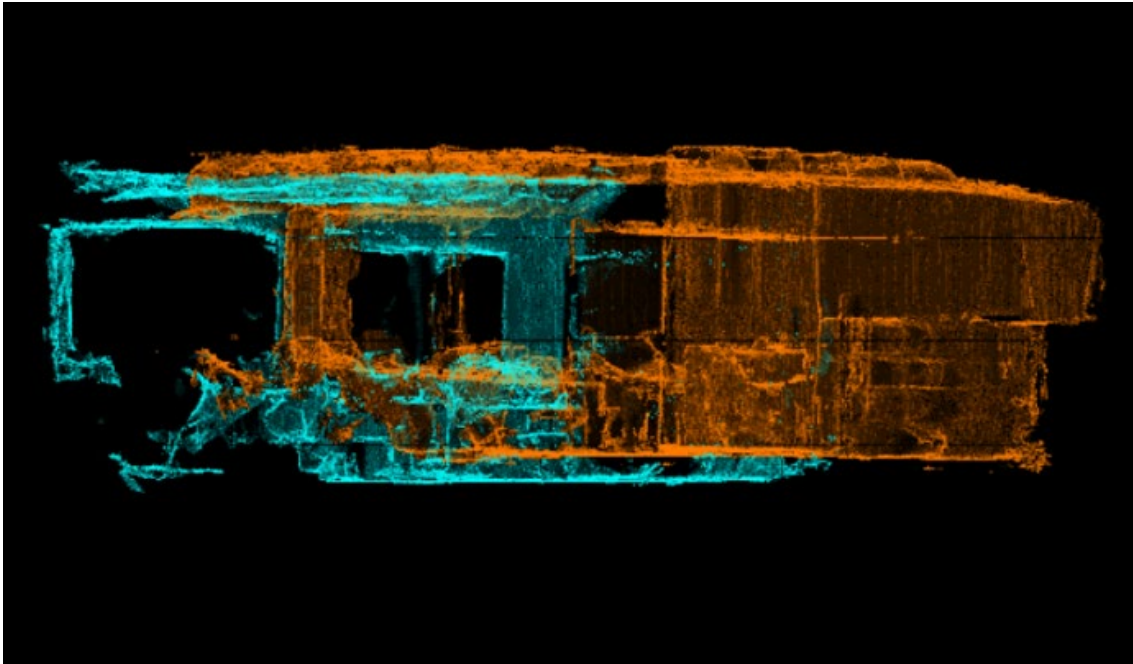


Fig. 23 Allineamento manuale in pianta e secondo l'asse z

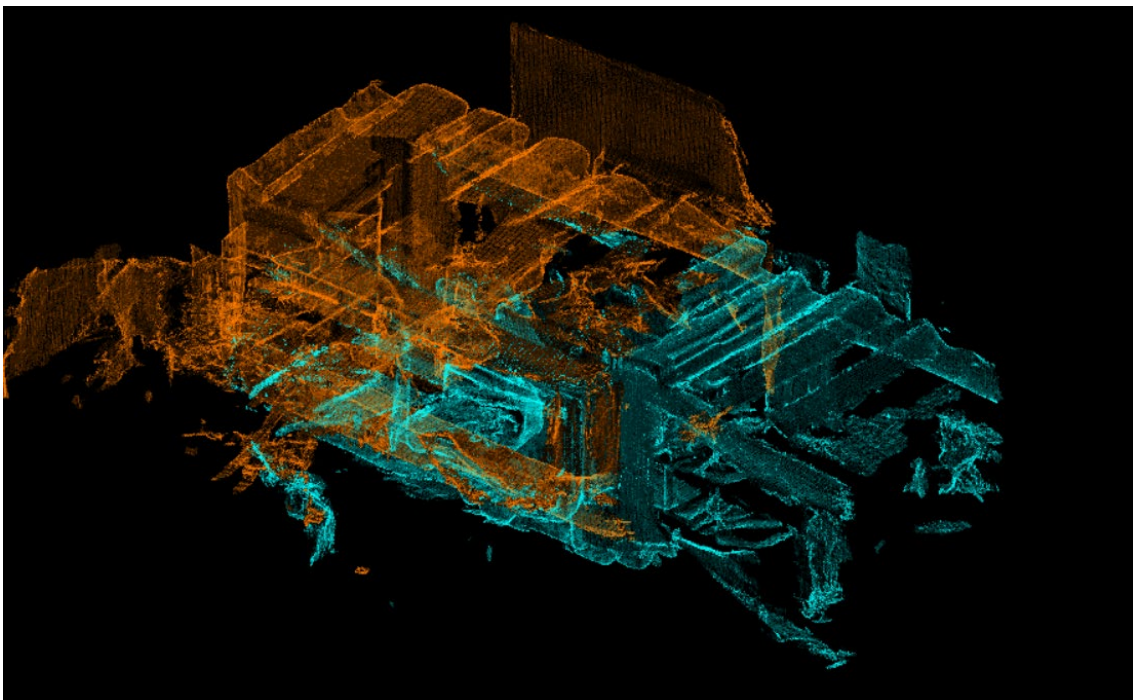


Fig. 24 Allineamento manuale su visualizzazione 3D

A questo punto si è proceduto con il collegamento delle singole nuvole tra loro, in modo da ottenere un'unica entità da esportare e poi ripulire: come evidenziato dalla figura 25, il software, una volta completato l'allineamento e confermato i primi collegamenti, è in grado di suggerire lui stesso la correlazione tra le diverse posizioni (linee bianche tratteggiate, mentre in blu sono rappresentati i collegamenti già effettuati). Questo consente di effettuare il

procedimento anche da parte di non esperti del settore e di giungere al risultato desiderato in tempi ristretti.

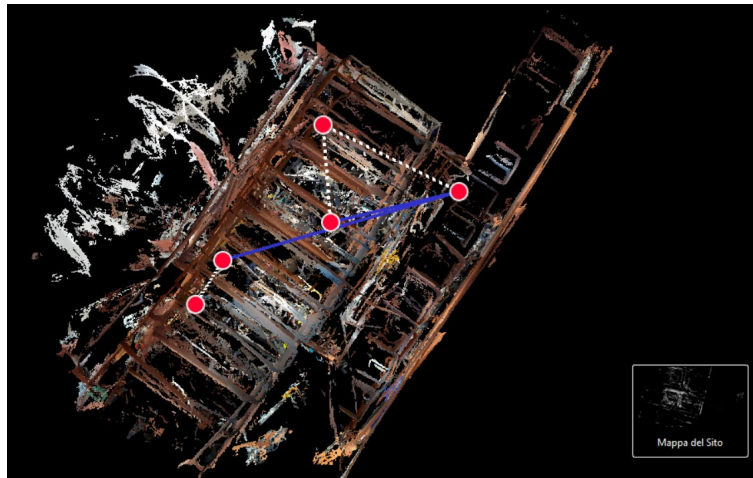


Fig. 25 Collegamenti tra le acquisizioni

Viene di seguito riportata un'immagine della nuvola di punti registrata, prima della pulizia: come si può notare, le aree in prossimità delle finestre (punti bianchi) presentano una forte deviazione rispetto al piano e vanno a influenzare notevolmente la leggibilità della nuvola, mentre le zone del pavimento, omogenee e monocolori, presentano scarsità di punti.



Fig. 26 Nuvola di punti completa prima della pulizia

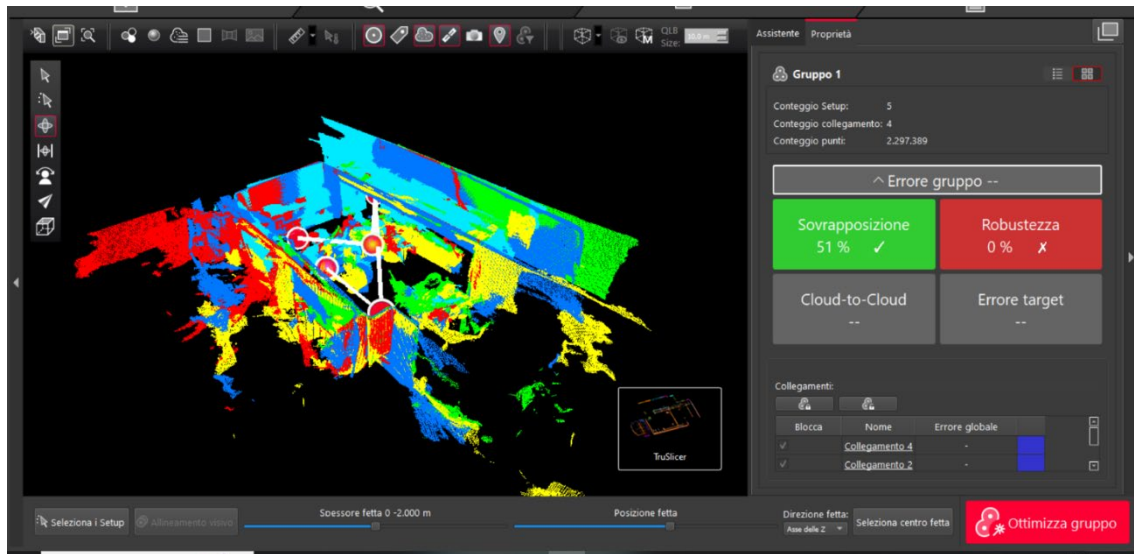


Fig. 27 Sovrapposizione e complanarità delle diverse acquisizioni

È stato infine esportato un report della registrazione, per poter più agilmente confrontare i risultati tra i diversi metodi di acquisizione: la robustezza allo 0% è dovuta al fatto che tutti collegamenti sono stati creati manualmente e il software non ha quindi modo di verificare la loro correttezza.

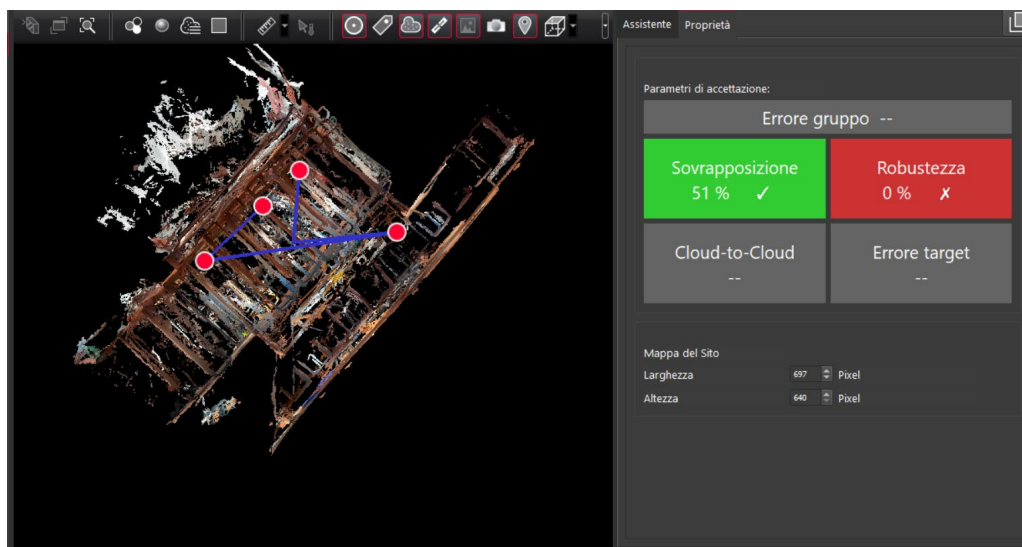


Fig. 28 Report Registrazione

Pulizia nuvola di punti e importazione in Revit

Come si può già intuire dalla nuvola di punti non ancora ripulita, la densità e quantità dei punti acquisiti non permette di portare avanti la modellazione interamente basata su Point Cloud, né tantomeno l'estrazione di una mesh per la modellazione semiautomatica.

La quantità di dati così acquisiti, però, è sufficiente per la verifica dello stato di fatto reale rispetto a quello depositato secondo progetto finale: la nuvola estratta con mobile device è stata perciò impiegata come raffronto per il processo identificato precedentemente come Scan-to-BIM.

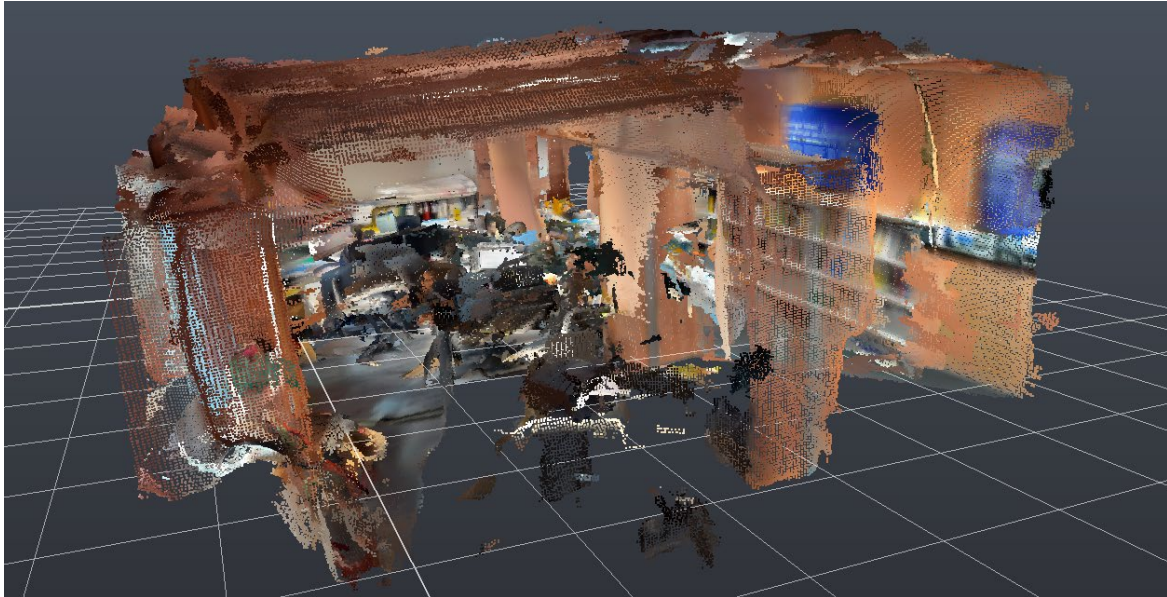


Fig. 29 Importazione nuvola in Recap

Per consentire questo confronto la nuvola deve essere però ripulita da punti in eccesso e da quelli disturbati: sapendo di procedere con la modellazione tramite software Revit ed essendo quindi già in possesso della Suite Autodesk, il file .E57 esportato da Register è stato importato in Autodesk Recap, così da poter poi essere salvato come file .rcp, più compatibile e quindi veloce rispetto al software di modellazione.

Come si evince dall'immagine, la nuvola estratta è funzionale non solo alla verifica delle effettive condizioni dello stabile, ma anche per il posizionamento degli arredi, spesso non inseriti nelle piante CAD ma da modellare se i requisiti del modello individuati lo richiedono.

7.2.2. [Acquisizione con laser scanner statico BLK360G2](#)

Il secondo metodo di acquisizione prevede l'utilizzo di un laser scanner statico, sempre in abbinamento con l'applicazione mobile Cyclone FIELD 360 e i programmi Cyclone Register 360 Plus e Cyclone 3DR per la registrazione e pulizia della nuvola di punti e l'estrazione della mesh.

Il laser scanner utilizzato è il BLK360G2 della Leica. Lo strumento ha la possibilità di impostare tre diverse densità di punti in acquisizione (misurata in punti a 10 m) e tre diverse risoluzioni delle immagini acquisite: a seconda delle impostazioni scelte, varia il tempo di scansione, compreso tra 30 sec e i 2 min circa.

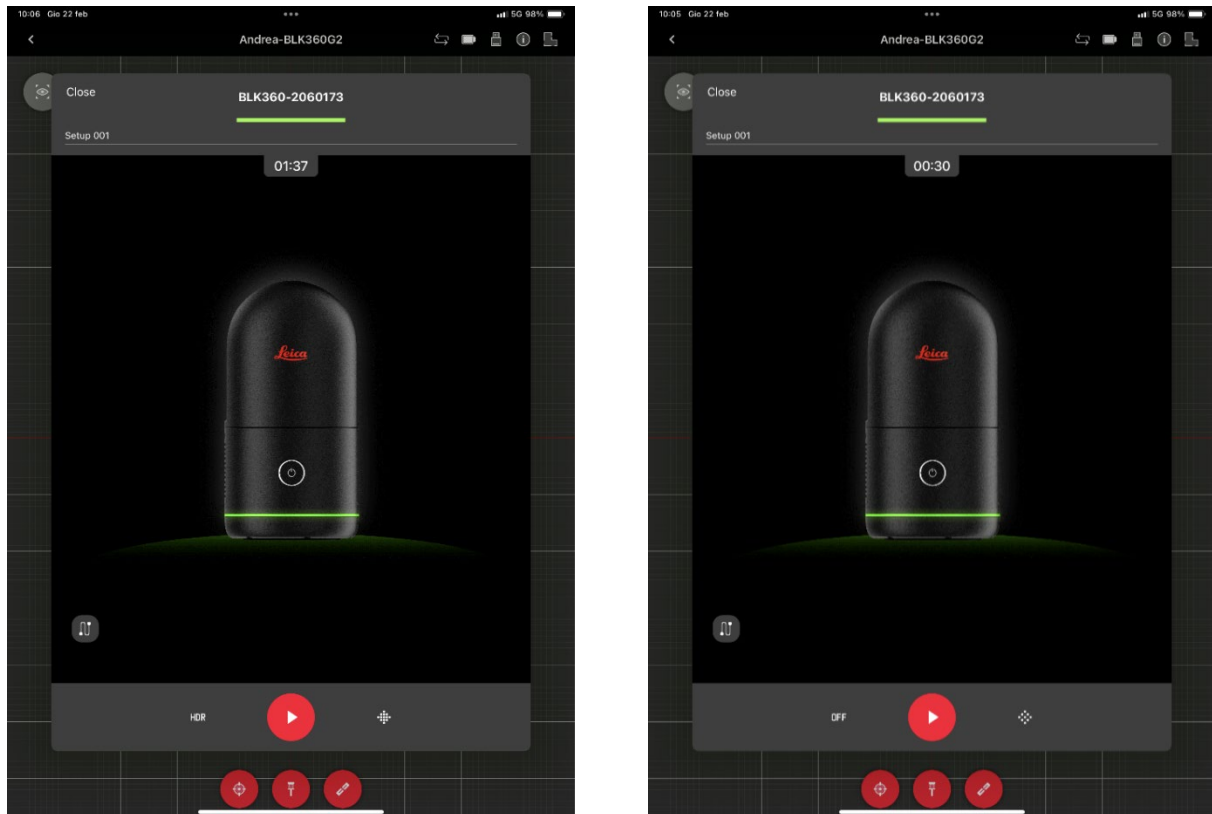


Fig. 30 Tempi di scansione a media densità senza immagini e scansione ad alta densità con immagini HDR

Il BLK360 utilizza il sistema VIS Leica: dopo la prima scansione, lo strumento avvia la fotocamera durante la fase di spostamento, individuando punti di ancoraggio e riconoscendo così la propria posizione rispetto alla scansione precedente, permettendo così di effettuare una preregistrazione automatica delle acquisizioni direttamente sul campo.

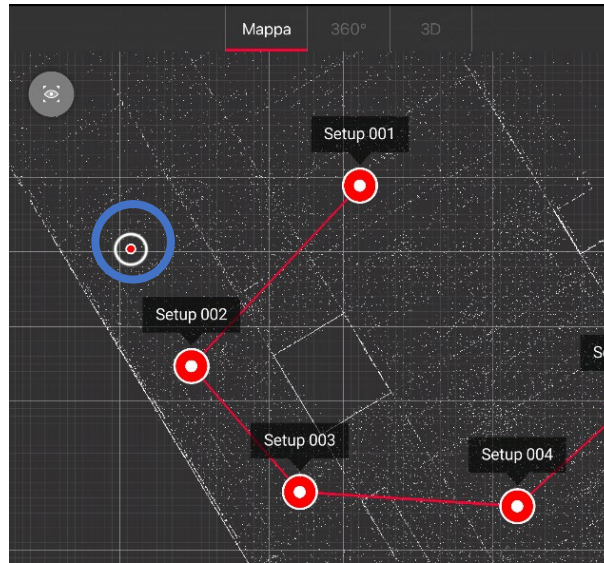


Fig. 31 Funzionamento sistema VIS

Utilizzando l'applicazione Cyclone FIELD su un device provvisto di tecnologia LiDar è inoltre possibile integrare le scansioni con acquisizioni da dispositivo mobile, così da completare la nuvola di punti con le zone cieche o, quando non vi è la possibilità, di effettuare un'ulteriore scansione.

L'ambiente scelto è ancora l'ufficio open space A4.03, situato al quarto piano, considerato però per tutto il suo sviluppo.

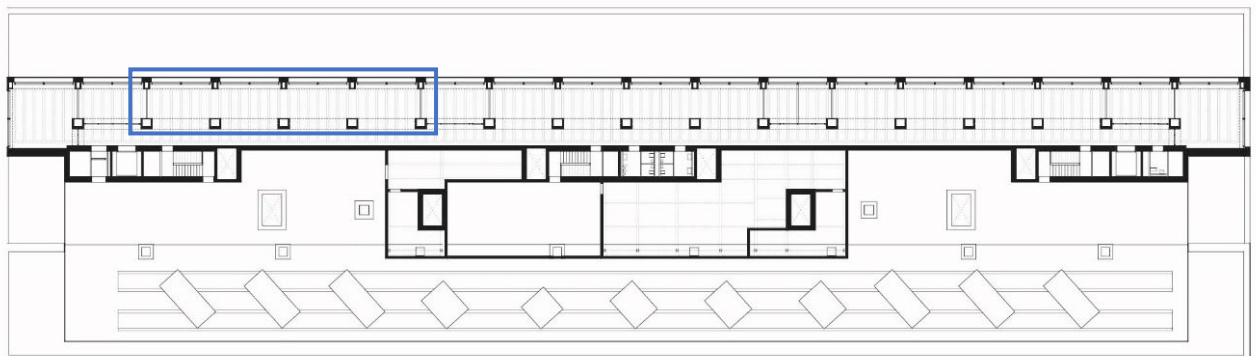


Fig. 32 Campus SUPSI, Mendrisio - 4° piano

Acquisizione

Per mappare la porzione di piano relativa all'ufficio A4.03 sono state effettuate 18 scansioni, di cui la dodicesima vuota in quanto effettuata nel momento in cui si è scaricata la batteria.

La posizione delle scansioni è stata definita considerando una distanza massima di una decina di passi tra due successive e verificando in tempo reale sull'IPad le aree non ancora rilevate o coperte da arredi: l'associazione dello scanner all'applicazione Cyclone FIELD permette infatti di registrare le scansioni direttamente sul device mobile e di poter osservare lo stato della nuvola di punti.

La prima scansione è stata effettuata nella campata centrale dell'open space, spostandosi poi verso la sala riunioni e tornando indietro attraverso il corridoio, così da ottenere una panoramica completa e chiudendo il percorso. Per quanto riguarda la qualità

della nuvola, dato lo spazio chiuso e l'obiettivo della scansione, si è deciso di impostare una densità di un punto ogni cm a 10 m e acquisizione di immagini HDR, arrivando così a 50s secondi per ogni scansione.

Per sfruttare al massimo la tecnologia VIS è stato necessario spostare lo scanner con l'accortezza di evitare che le fotocamere fossero coperte dall'operatore e procedere lentamente così da consentire ai sensori di ancorarsi. Questo ha permesso di registrare le nuvole non appena conclusa la scansione con il comando *Link Rapido*, che posiziona automaticamente la nuova acquisizione in relazione alle precedenti.



Fig. 33 Tempi di acquisizione

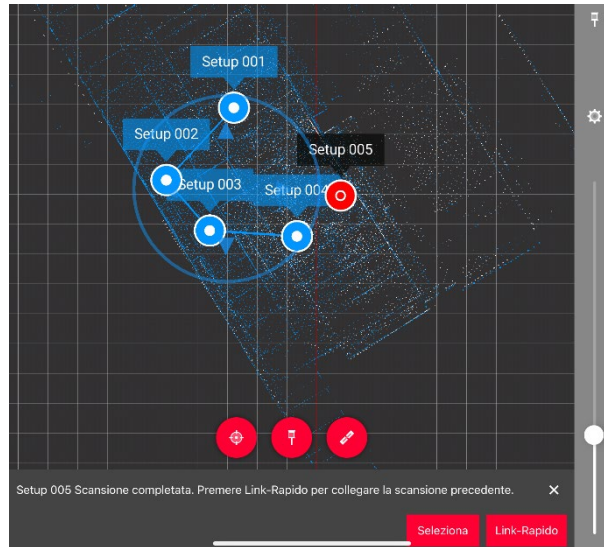


Fig. 34 Comando Link Rapido

La creazione della nuvola di punti per lo spazio considerato ha richiesto circa un'ora, considerando anche i rallentamenti dovuti al cambio della batteria e alla necessità di ripristinare manualmente il collegamento tra la scansione 11 e la scansione 13: una volta spento, infatti, lo strumento perde i punti di riferimento ed è necessario ristabilire, anche attraverso il dispositivo mobile, le coordinate tra due acquisizioni successive.

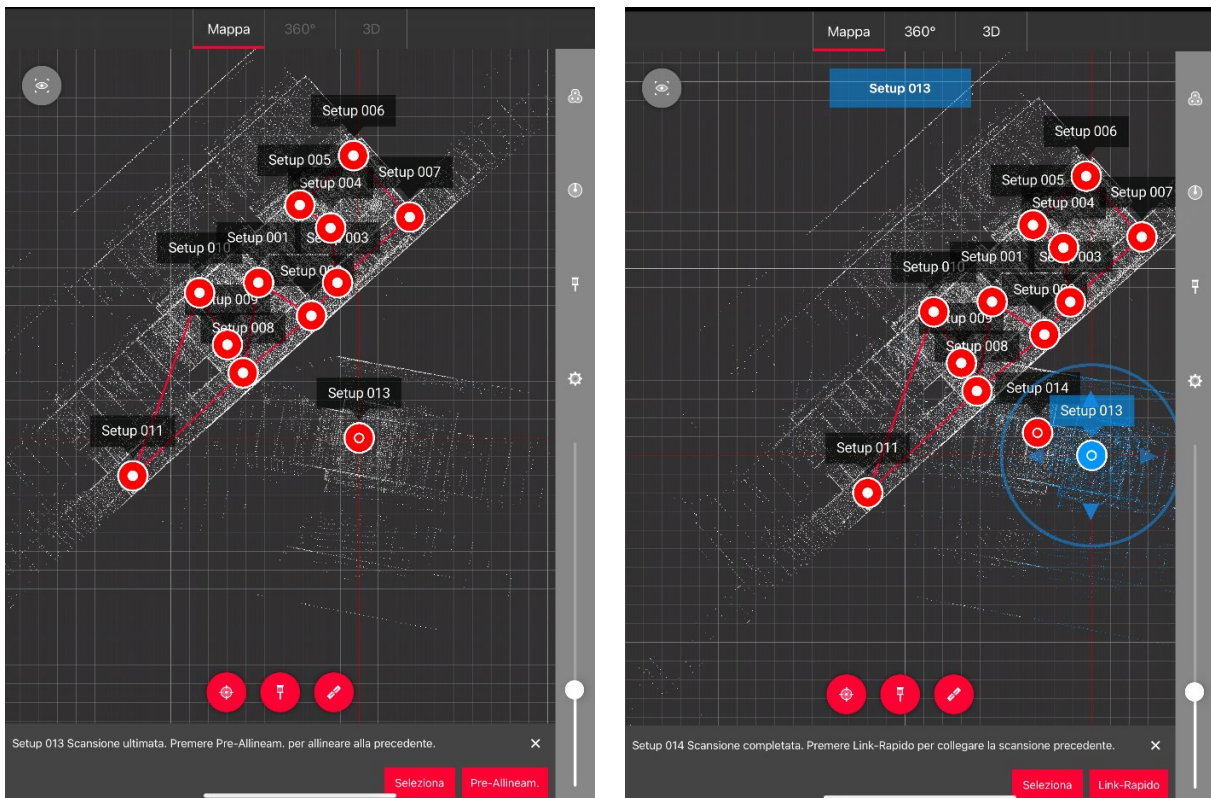


Fig. 35 Allineamento manuale

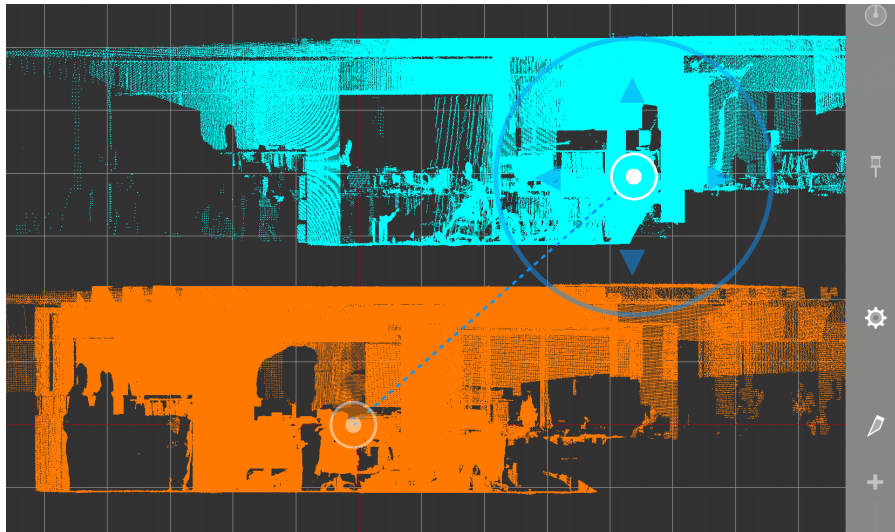


Fig. 36 Allineamento sull'asse z



Fig. 37 Laser Scanner - Posizione 8

Ulteriori rallentamenti sono stati causati dall'errata registrazione automatica del SetUp 8: la conformazione dello spazio, regolare e scandita da elementi (quali pilastri e travetti del soffitto) tutti uguali e cadenzati, ha "confuso" il laser che ha associato in uno unico i due pilastri successivi e ha perciò spostato di una campata l'acquisizione numero 8. Come evidenziato nell'immagine n. 36, è stato necessario eliminare il collegamento e riposizionarlo manualmente, con l'opzione di *doppia visualizzazione*.

Il tempo necessario a riposizionare il collegamento sul campo ha sottolineato l'importanza di una corretta acquisizione della nuvola di punti e la necessità di ottimizzare il più possibile la sua registrazione: lavorando su un intero edificio, con nuvole acquisite su più piani, la complessità aumenta e conseguentemente aumentano il tempo e l'abilità richiesta all'operatore per una corretta resa.

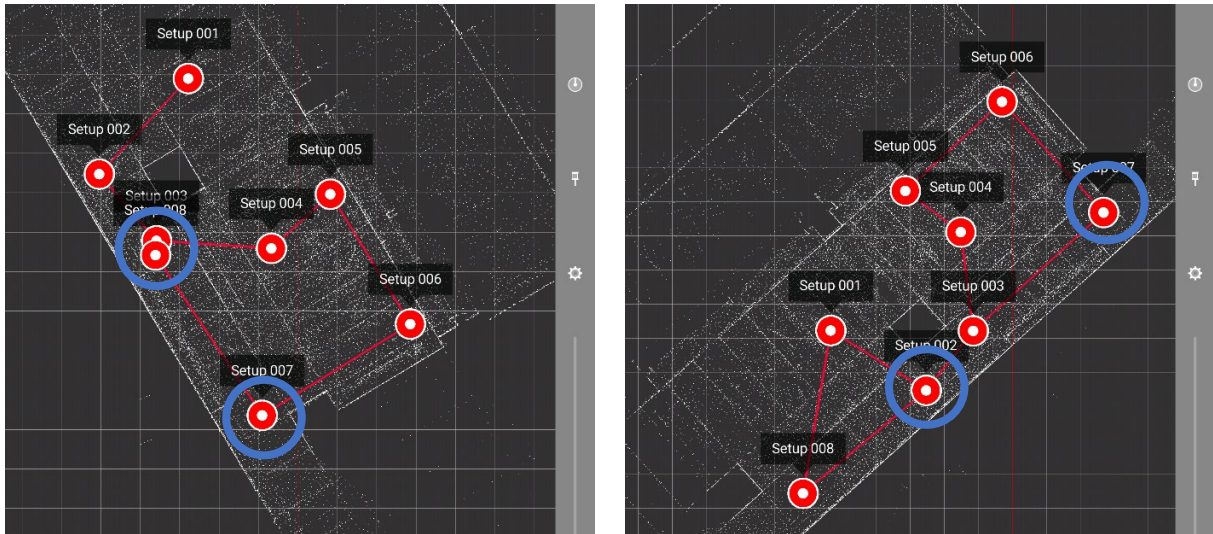


Fig. 38 Allineamento automatico non corretto

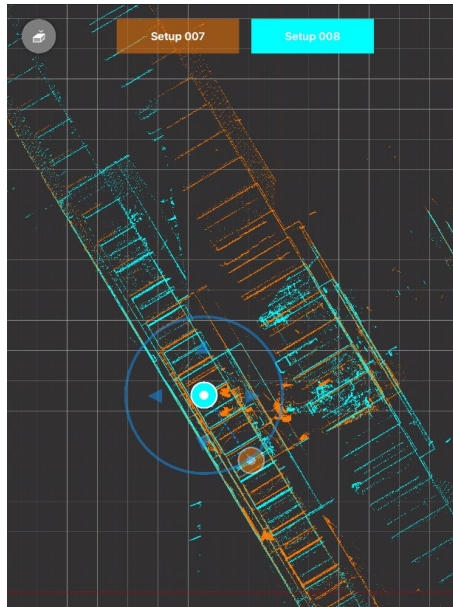


Fig. 39 Doppia visualizzazione di due acquisizioni successive

Registrazione

Il file esportato dal laser scanner è stato importato su Cyclone Register: essendo stata effettuata la preregistrazione sul campo, le scansioni si presentano già collegate tra di loro e allineate. È importante sottolineare come il file estratto dal laser pesi circa 5Gb: in un'ottica di ottimizzazione è quindi necessario definire con precisione le impostazioni di acquisizione, così da evitare file inutilmente pesanti e di difficile gestione.

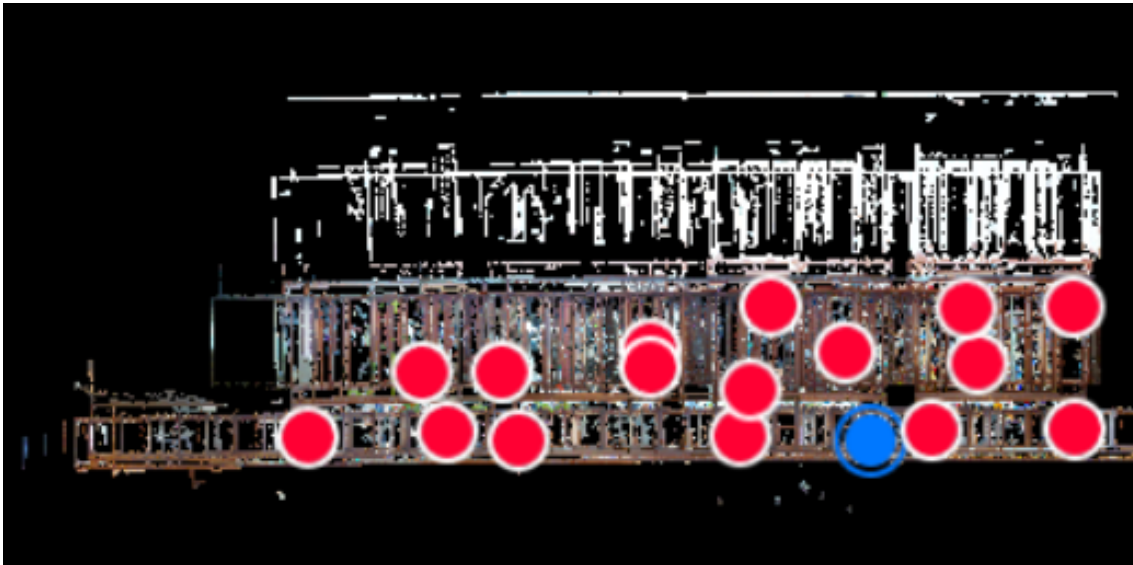


Fig. 40 Nuvola importata su Register

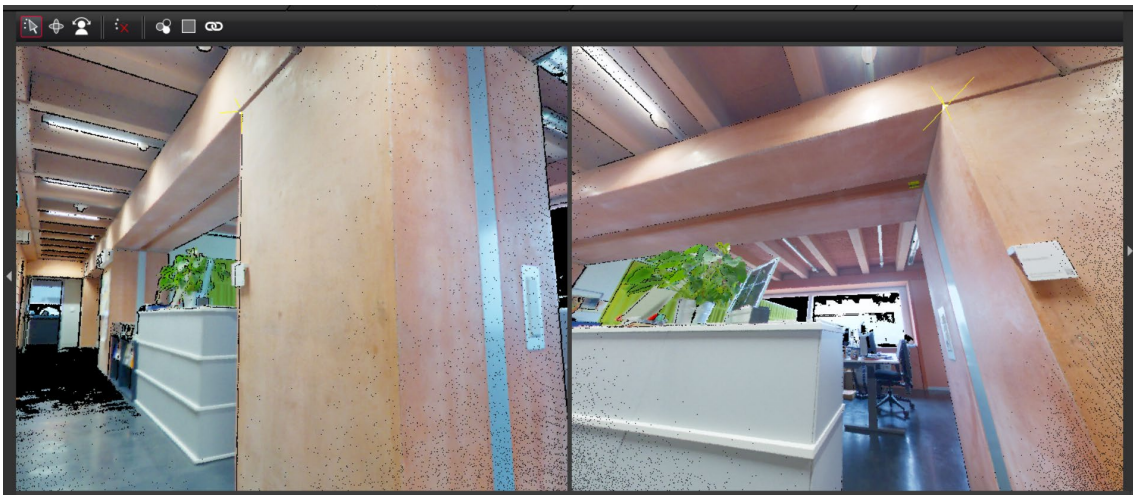


Fig. 41 Visualizzazione nuvola di punti importata

Come evidenziato dalla figura 42, però, non tutte le acquisizioni sono state registrate correttamente: i collegamenti rossi, infatti, sono quelli che presentano un errore complessivo superiore ai 10 mm (quelli verdi un errore inferiore ai 7 mm e quelli blu creati dall'utente).

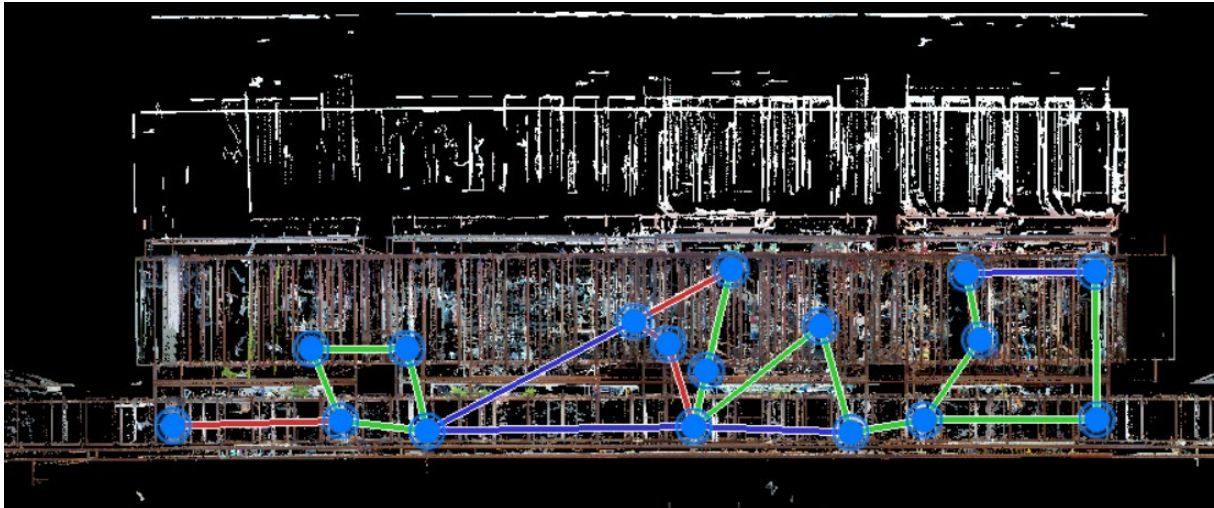


Fig. 42 Tipologia collegamenti preregistrati

È stato quindi necessario provvedere a una correzione manuale, attraverso l'allineamento visivo delle nuvole coinvolte: in particolare si è dovuto correggere la sovrapposizione del SetUp 10 e del SetUp 13, anche grazie alle immagini catturate durante la scansione, che hanno consentito di determinare esattamente la posizione al momento dell'acquisizione.

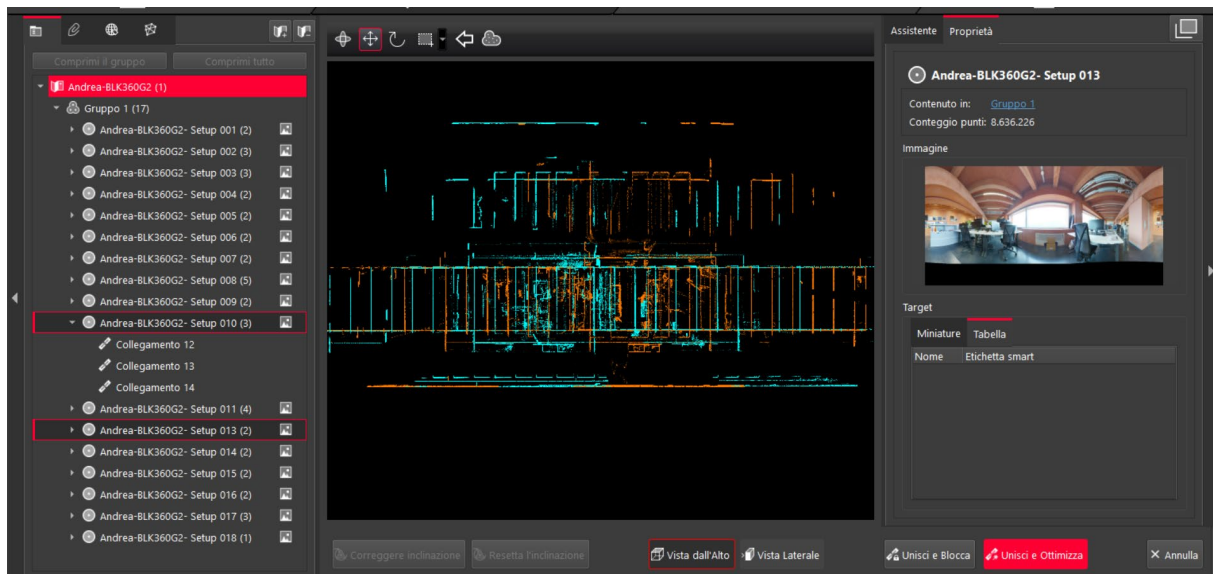


Fig. 43 Doppia visualizzazione per correzione errori di collegamento

Procedendo quindi con la correzione degli altri collegamenti e la creazione di nuovi collegamenti per la chiusura del percorso, si è ottenuta la nuvola finale da esportare: come evidenziato dall'immagine 42, è stato raggiunto un errore complessivo inferiore ai 7 mm per l'intera nuvola di punti, con una robustezza dei collegamenti del 78%.

Procedendo con le ottimizzazioni si sarebbe potuto raggiungere un livello di robustezza superiore ma, considerando gli obiettivi di progetto, il livello così ottenuto è sufficiente alla modellazione successiva.

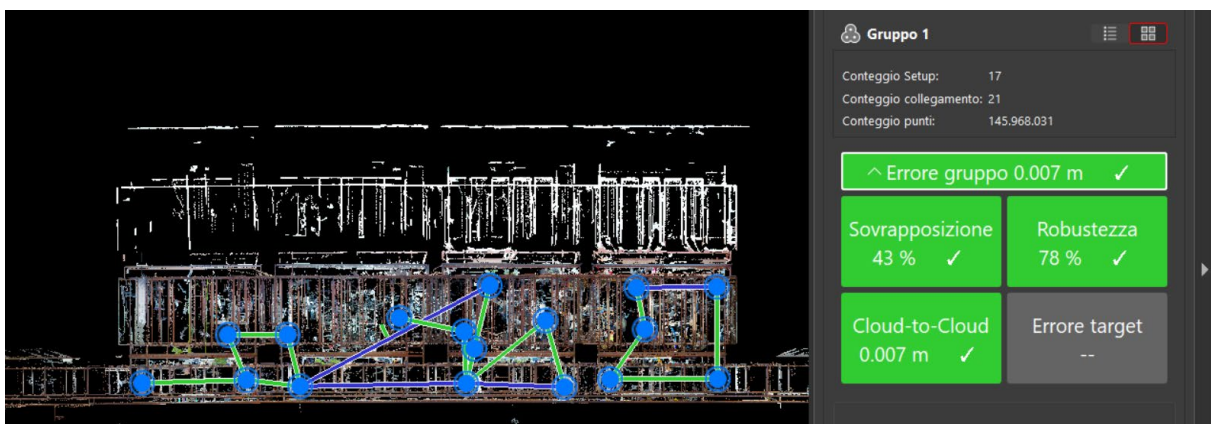
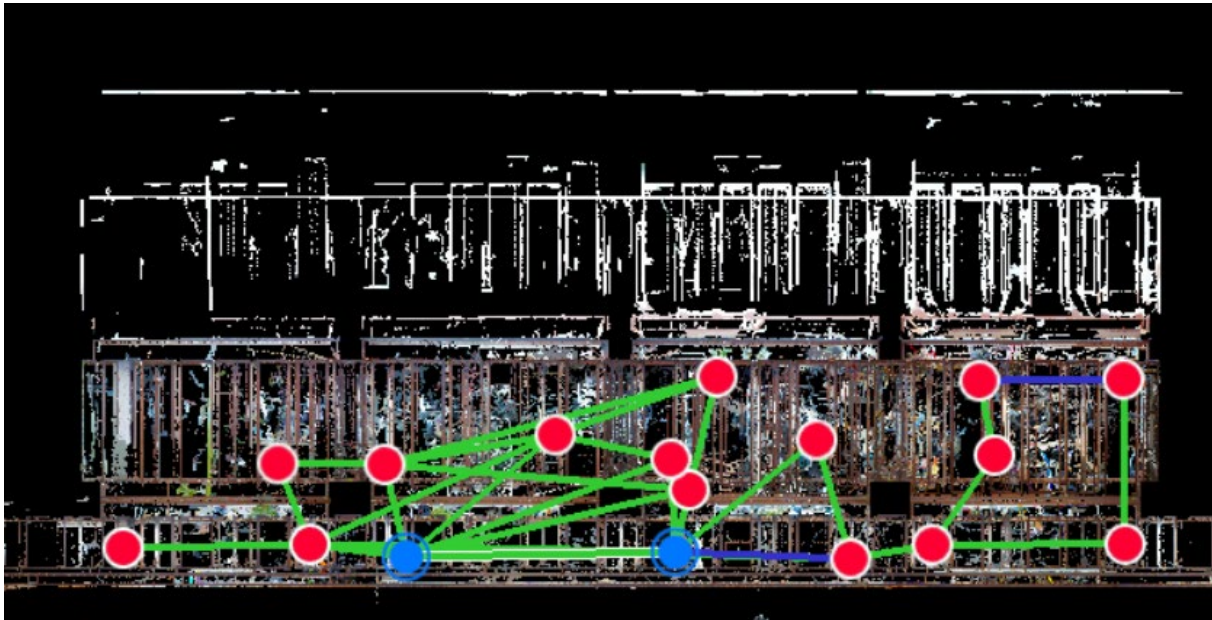


Fig. 44 Report registrazione

L'ultimo passaggio della registrazione è stato l'aggiornamento delle coordinate della nuvola di punti, così da allineare l'asse x secondo lo sviluppo principale degli ambienti e agevolare quindi la visualizzazione secondo gli assi convenzionali e non dover ruotare successivamente la nuvola di punti.

Pulizia e esportazione mesh

la pulizia della nuvola di punti, al fine di rendere la modellazione il più ottimizzata possibile, è stata condotta attraverso due diversi software, così da poter confrontare gli output finali:

- Cyclone 3DR: avendo effettuato la scansione con uno strumento Leica e avendo accesso come studente ai software Leica, è risultato naturale continuare il processo attraverso software Leica. È da considerare, però, che questo software ha un costo aggiuntivo rispetto all'utilizzo dell'app per l'acquisizione della nuvola di punti sul campo e potrebbe non essere quindi la scelta più vantaggiosa in un caso lavorativo.
- Autodesk Recap: dal momento che il software di modellazione 3D per l'edilizia tra i più diffusi sul mercato è Revit e il suo utilizzo comporta l'acquisto dell'intera Autodesk Suite, è molto probabile che uno studio che si occupa di ingegneria edile/architettura sia già in possesso delle licenze necessarie ad utilizzare Recap. Si è così deciso di analizzare anche il risultato ottenuto con questo software.

Cyclone 3DR

Il primo passaggio è stata l'importazione su Cyclone 3DR del file formato .lgs precedentemente esportato da Register: essendo un formato proprietario di Leica l'importazione è stata più rapida rispetto a un formato di nuvola standard, come .E57, comunque compatibile.

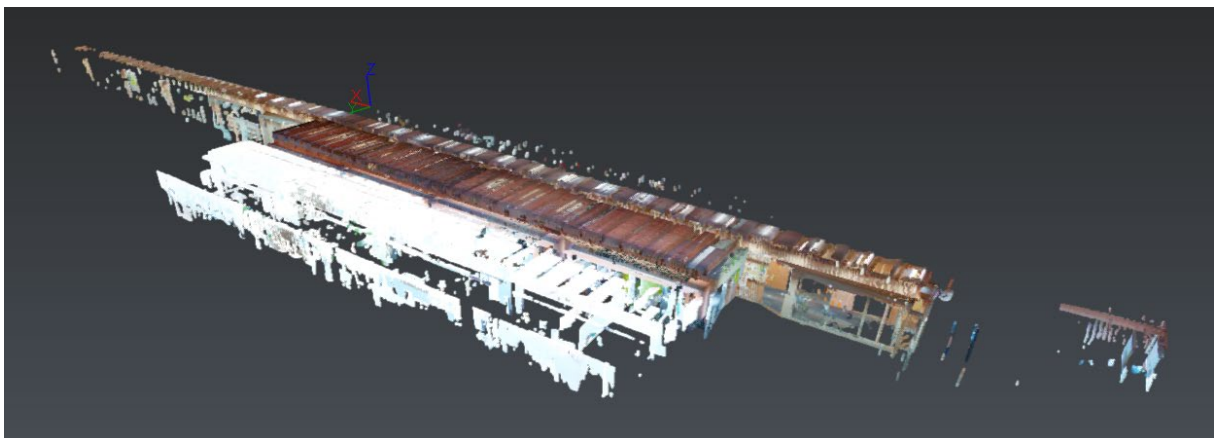


Fig. 45 Nuvola importata su 3DR

La nuvola di punti così importata contiene ancora tutti i punti acquisiti, compresi arredi e persone e il disturbo dovuto alla presenza delle finestre. Si è quindi proceduto a eliminare i punti non necessari alla modellazione, modificando il riquadro di sezione secondo gli assi principali e lasciando solo i muri perimetrali, ciò che è stato acquisito del pavimento, il soffitto e i pilastri.

Purtroppo, però, la mesh generata in seguito a questo processo di pulizia è risultata grossolana e imprecisa, con le pareti principali non complanari: questo probabilmente perché,

ripulendola, la nuvola di punti ha perso definizione. Si è così deciso di invertire il processo, generando prima la mesh dalla nuvola di punti ripulita solo del disturbo e dei punti in eccesso e procedendo poi a eliminare gli elementi non necessari alle fasi successive.

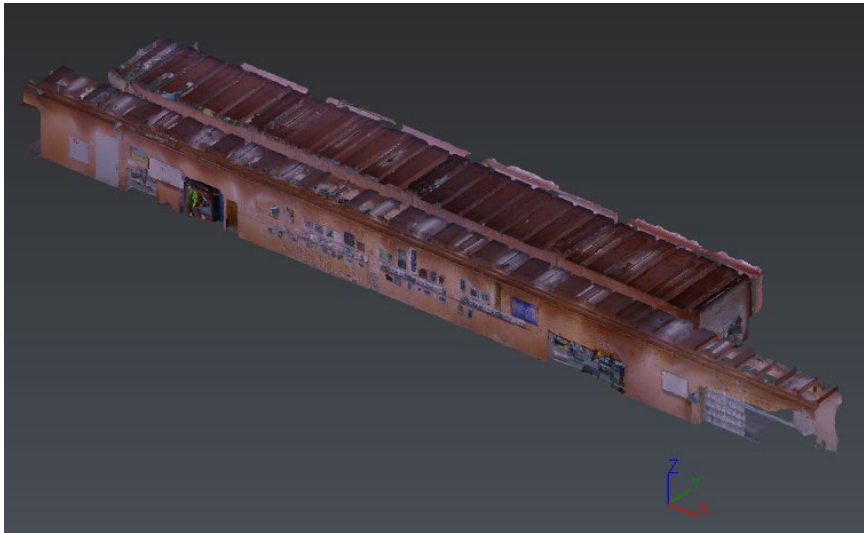


Fig. 46 Mesh completa

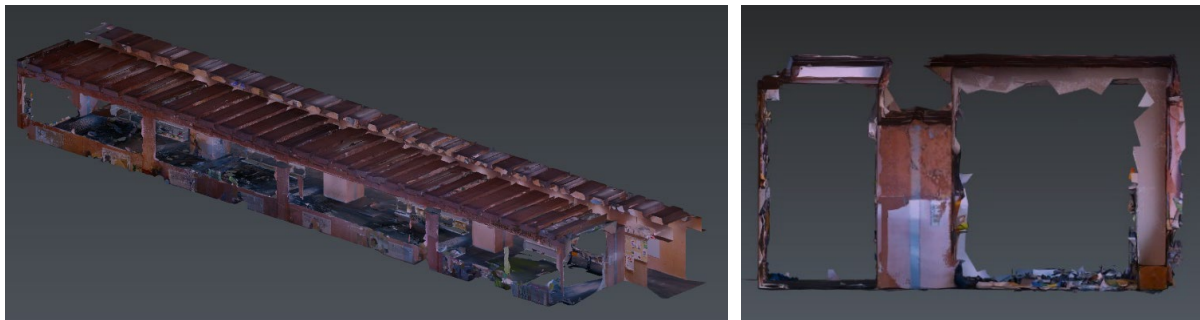


Fig. 47 Mesh ripulita da arredi e persone

Seppur ripulita, la mesh presenta ancora notevole disturbo ed è di difficile utilizzo per l'importazione in Revit e la modellazione semiautomatica. Dalla mesh ripulita sono stati quindi estratti i piani perpendicolari principali, grazie alla classificazione automatica degli elementi (pareti, pavimenti, pilastri, soffitti, travi, etc.) presente su Cyclone 3DR, e da questi è stata esportata la mesh finale, sia in formati .dxf che .obj.

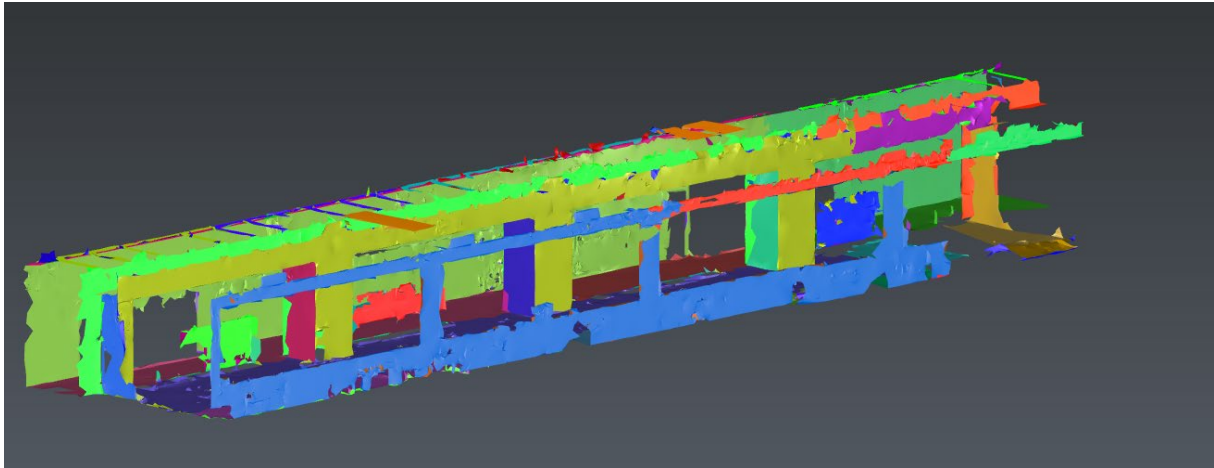


Fig. 48 Classificazione automatica elementi

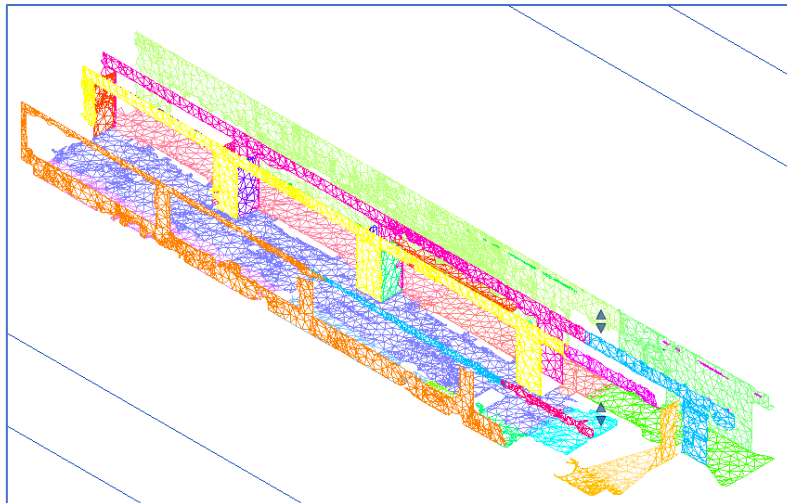


Fig. 49 Mesh generata dai piani classificati

Autodesk ReCap

Vista la diffusione della suite Autodesk sul mercato, si è proceduto anche alla pulizia della nuvola di punti attraverso ReCap: purtroppo non è stato possibile esportare la mesh in quanto, seppur la funzione sia disponibile nel software, richiede il pagamento di una quota aggiuntiva, non prevista dalla licenza standard. Dopo la pulizia, la nuvola di punti sarà quindi utilizzata come base per la modellazione, senza però utilizzare le funzioni avanzate di selezione delle superfici per la creazione di elementi.

La nuvola importata, come per il processo già descritto, è stata ripulita dai punti di disturbo dovuti alla presenza delle finestre e quelli acquisiti in eccesso.

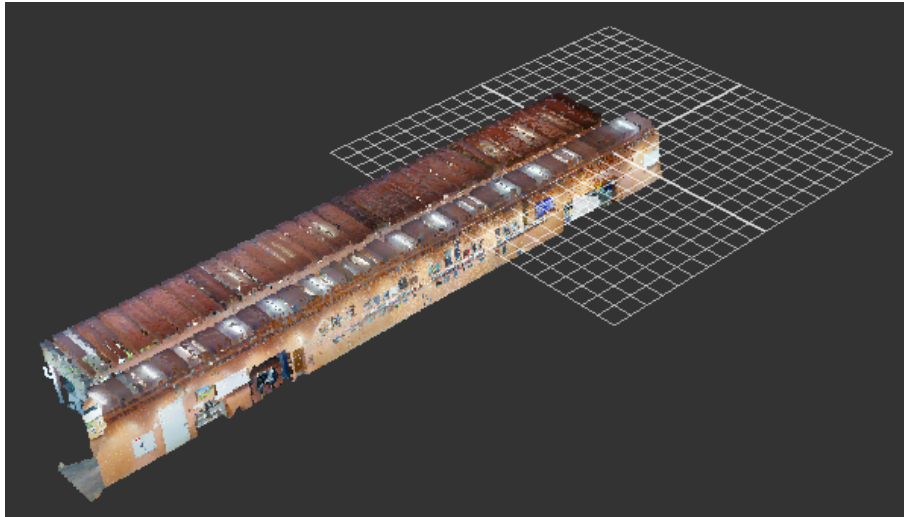


Fig. 50 Nuvola ripulita dai punti di disturbo

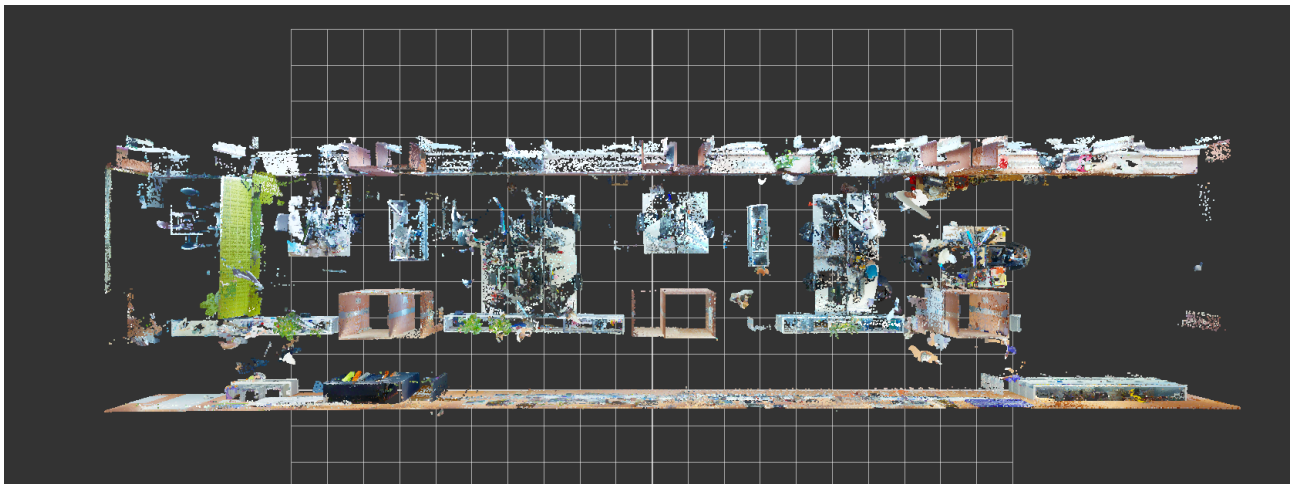


Fig. 51 Visualizzazione "a fette"

7.2.3. Acquisizione con laser mobile BLK2Go

Il secondo metodo di acquisizione prevede l'utilizzo di un laser scanner portatile, sempre in abbinamento con l'applicazione mobile Cyclone FIELD 360 e i programmi Cyclone Register 360 Plus e Cyclone 3DR per la registrazione e pulizia della nuvola di punti e l'estrazione della mesh.

Il laser scanner utilizzato è il BLK2Go della Leica. Si tratta di un dispositivo portatile che permette di acquisire nuvole di punti e immagini mentre l'operatore è in movimento, consentendo così di ridurre sensibilmente i tempi di acquisizione; la precisione dello strumento è però inferiore rispetto a un laser statico, riuscendo a raggiungere risultati nell'ordine del cm.

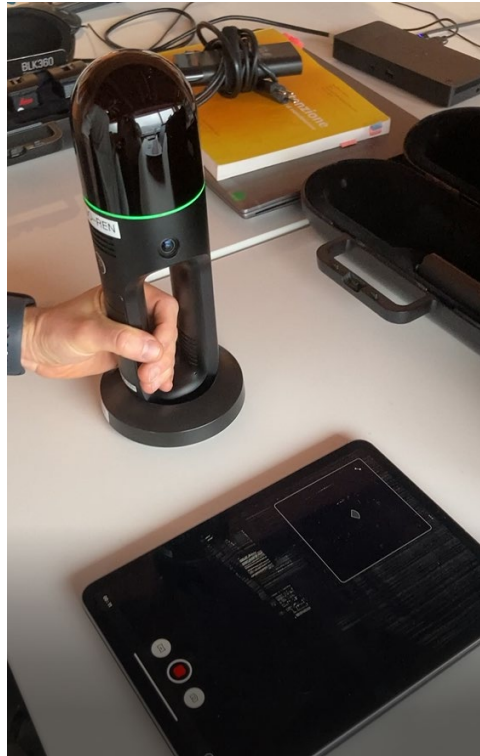


Fig. 52 BLK2Go in collegamento con l'app

L'ambiente scelto è ancora l'ufficio open space A4.03, situato al quarto piano, considerato per tutto il suo sviluppo, come per il laser scanner statico.

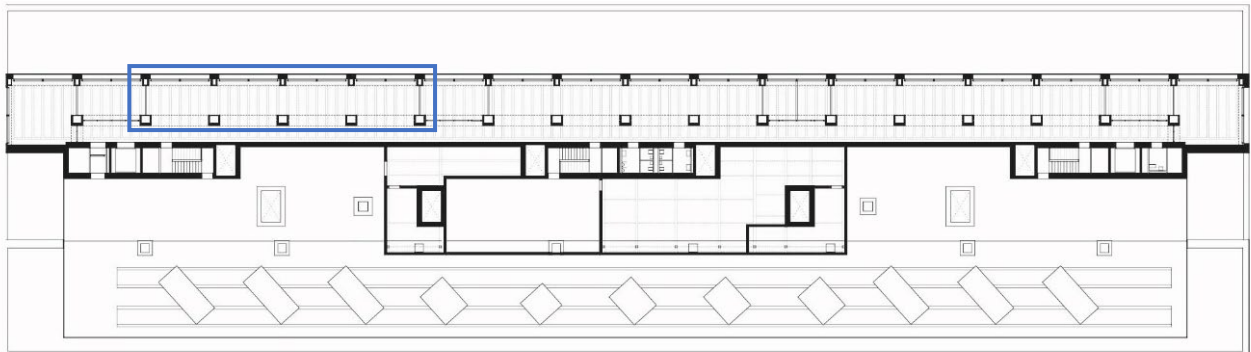


Fig. 53 Campus SUPSI, Mendrisio - 4° piano

Acquisizione

Il laser portatile BLK2Go richiede di percorrere un circuito chiuso per la registrazione di un ambiente: partendo dal centro dell'open space si è quindi percorso lo spazio tra le scrivanie per poi passare nel corridoio e tornare indietro al punto di partenza. L'acquisizione ha richiesto, in totale, meno di cinque minuti.



Fig. 54 Acquisizione con laser portatile

Al contrario del laser statico che registra una scansione a 360 gradi per ogni acquisizione, il laser portatile ha una finestra di acquisizione definita: se vi è quindi necessità di acquisire informazioni al di fuori di questa (pavimenti, soffitti o aree fuori dall'angolo frontale), l'operatore dovrà girarsi nella direzione dell'oggetto o sollevare/abbassare l'inquadratura.

Durante l'acquisizione, dall'app collegata, si può visualizzare in tempo reale come sta procedendo la registrazione dei punti e se ci sono quindi delle aree in cui ripassare o su cui rallentare; è possibile inoltre scattare manualmente una fotografia di punti interessanti: durante la registrazione, infatti, si potrà impostare una frequenza di viewpoint per la visualizzazione attraverso immagini ma questi saranno

estratti dal video acquisito e quindi non perfettamente a fuoco.

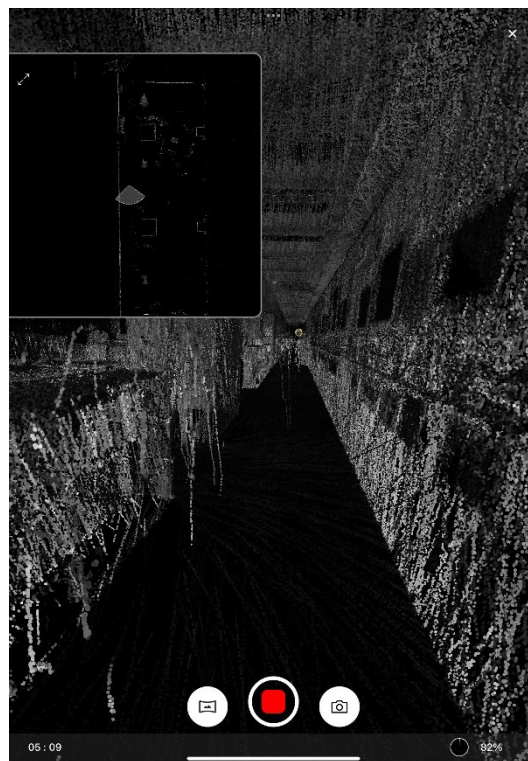


Fig. 55 Visualizzazione in tempo reale della nuvola acquisita

Lo strumento permette di effettuare rilevamenti su porzioni di grandi dimensioni in pochissimo tempo: questo risulta essere un grande vantaggio nel caso in cui si debba acquisire la geometria di interi edifici. Questa velocità implica, però, una diminuzione nel numero di punti acquisiti e una conseguentemente ridotta precisione della nuvola di punti; un ulteriore vantaggio è il minor numero di scansioni necessarie per ambiente, consentendo così lo scambio di file più leggeri.

Registrazione e Pulizia

Trattandosi di un'unica acquisizione per ambiente, la nuvola di punti rilevata con il laser portatile non necessita di registrazione e allineamento, come nel caso del laser statico, almeno finché la porzione in oggetto si trova sullo stesso piano. L'unico passaggio della registrazione è stato perciò la definizione di un sistema di coordinate parallelo alle pareti principali dello spazio, così da semplificare le sezioni secondo gli assi.

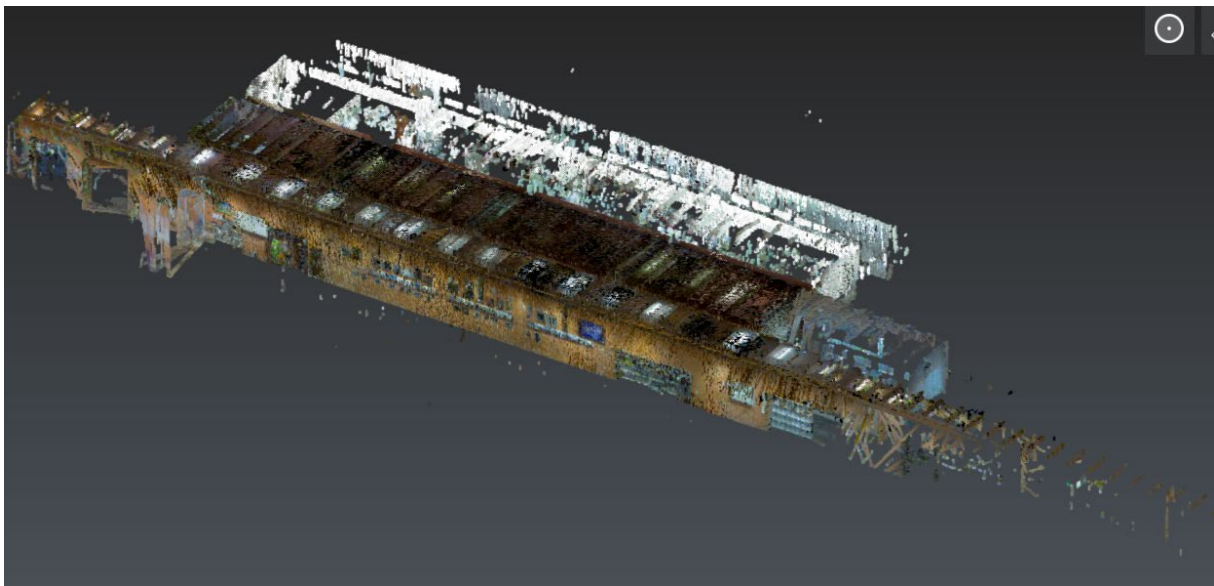


Fig. 56 Nuvola importata 3DR

La pulizia della nuvola ha seguito lo stesso principio di quella acquisita con laser statico: sono stati eliminati i punti disturbati, corrispondenti all'estremità della nuvola e quelli in prossimità dei serramenti così come i punti legati a persone o arredo non interessante per la modellazione. La nuvola è stata poi esportata in formato compatibile con Revit.



Fig. 57 Nuvola ripulita

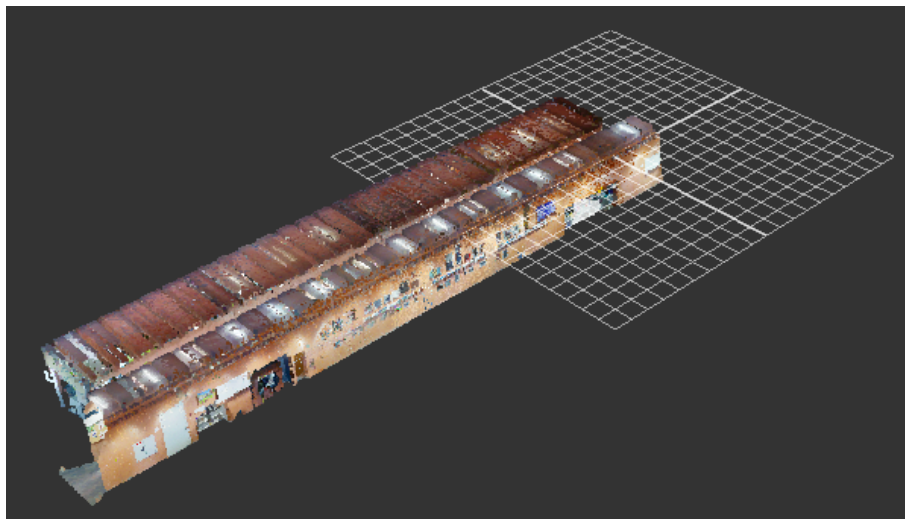


Fig. 58 Nuvola da laser statico

Già da un primo confronto tra la Fig. 57 e la Fig. 58 si può notare quanto la nuvola di punti acquisita con il laser portatile abbia definizione minore: il file si presenta complessivamente più leggero e maneggevole rispetto all'acquisizione più densa. La precisione dei punti è comunque sufficiente per utilizzare la nuvola di punti come base per la modellazione ma non abbastanza per definire piano perpendicolari: questo ha portato all'impossibilità di esportare una mesh utilizzabile.

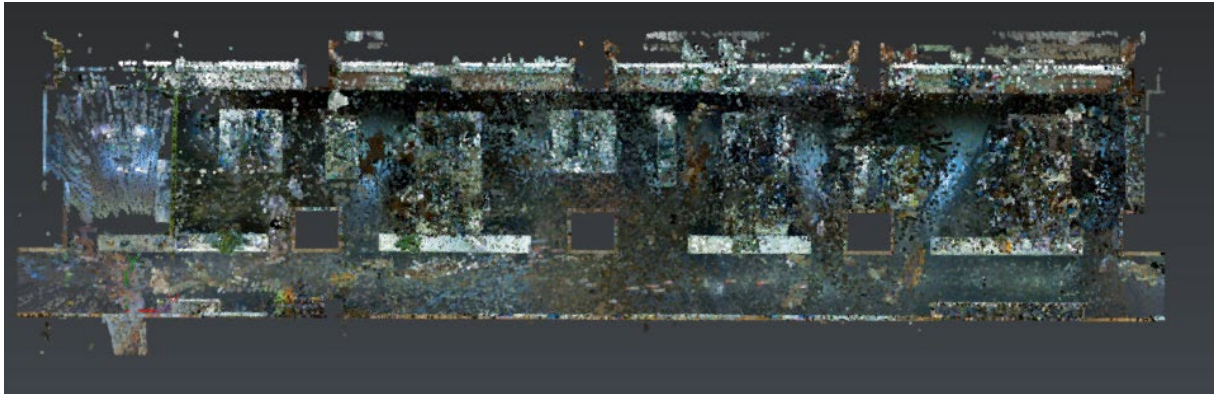


Fig. 59 Sezione della nuvola sull'asse z

7.3. Modellazione

Per quanto riguarda la modellazione sono stati sviluppati cinque differenti modelli, in modo da stabilire quale flusso di lavoro fosse il più conveniente rispetto agli obiettivi di progetto: la nuvola di punti acquisita da mobile device non è stata utilizzata come base di modellazione ma solo come confronto e verifica per lo Scan-vs-BIM. Il software utilizzato per la modellazione è Autodesk Revit 2024.

La modellazione ha seguito il seguente workflow:

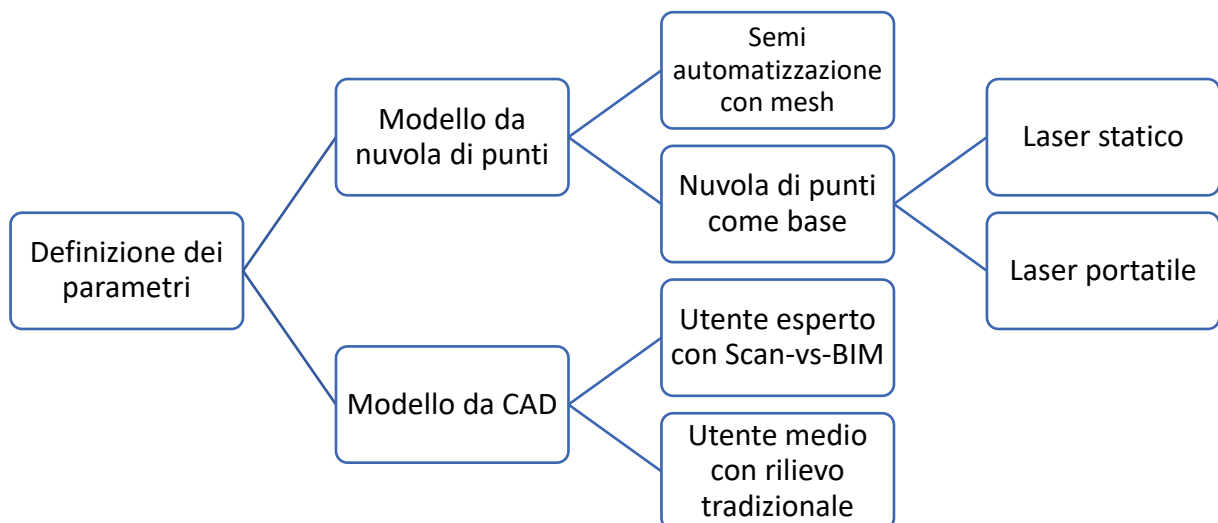


Fig. 60 Schema flusso modellazione

I parametri del modello necessari all'ottimizzazione relativa al caso studio (ottimizzazione della funzione e dell'uso degli spazi) sono basati requisiti precedentemente definiti.

In particolare, si è deciso di ricorrere agli elementi “vani” e “room” per far fronte a una problematica individuata durante la fase di definizione dei requisiti: volendo infatti ottimizzare la distribuzione degli spazi all’interno di un open space, è stato necessario separare il concetto di stanza, inteso come spazio adibito a una particolare funzione (ufficio adibito a un particolare team, sala riunione, area break, ...) e quindi particolari necessità degli utenti, dal concetto di zone, inteso come unità legata a caratteristiche dell’edificio esistente che vanno a influenzare le possibilità di distribuzione delle stanze (come la possibilità di separare l’accensione delle luci o il controllo della climatizzazione). Con un esempio pratico, la stanza A04.03-1 corrisponde all’area di lavoro del team Gestione Edifici, e definisce perciò il numero di postazioni lavoro che è necessario prevedere e le distanze minime tra gli elementi; questa stanza, però, si trova all’interno di una zone più ampia legata alla tipologia di impianti, che va a comprendere altre stanze. Le zone possono quindi contenere al loro interno più stanze o, viceversa, coprirne solo una parte: questa distinzione si è resa necessaria in quanto le semplici stanze non riescono a definire tutti i vincoli e le caratteristiche degli ambienti. Potrebbe capitare infatti che, considerando solo le room, la distribuzione ottimizzata degli spazi porti come soluzione più efficace lo spostamento delle stanze le une rispetto alle altre senza che però questo spostamento sia effettivamente realizzabile, a meno di non effettuare opere di redistribuzione degli impianti. I requisiti individuati per l’ottimizzazione sono riportati in tabella 3:

OBIETTIVO	DISCIPLINA	CATEGORIA	REQUISITI GEOMETRICI	REQUISITI INFORMATIVI	
				MODELLO	GESTIONE
Ottimizzazione funzione e uso spazi	ARC	Zone	Dimensioni	- Uso - Room associate - Come è servito dagli impianti - Vincoli gestionali	- Relazione con le altre zone e le room - Occupazione
		Room	- Dimensioni - Vincoli geometrici	- Destinazione - Impianti connessi - Vincoli gestionali	- Relazione con le zone e le room - Occupazione - Vincoli gestionali
		Elementi architettonici (pareti, pavimenti, ...)	- Lunghezza, altezza e spessore - Posizione	-	-
	MEP	Climatizzazione	-	- Tipologia - Posizione terminali	- Programmabilità - Manutenzione
		Illuminazione	-	- Tipologia	- Programmabilità - Automazioni - Manutenzione

Tabella 3 Requisiti per l’ottimizzazione

Rispetto ai requisiti individuati sono stati quindi specificati i parametri per ogni elemento modellato.

- ROOM:
 - Dimensioni – Area e Altezza
 - Vincoli geometrici - Occupancy
 - Destinazione – Name
 - Vincoli gestionale – Department

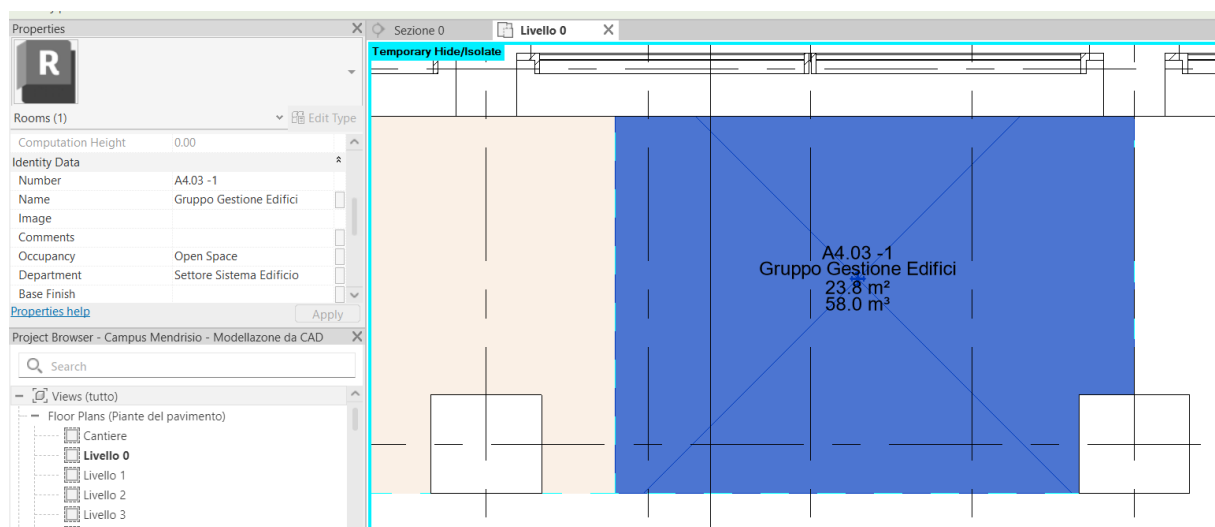
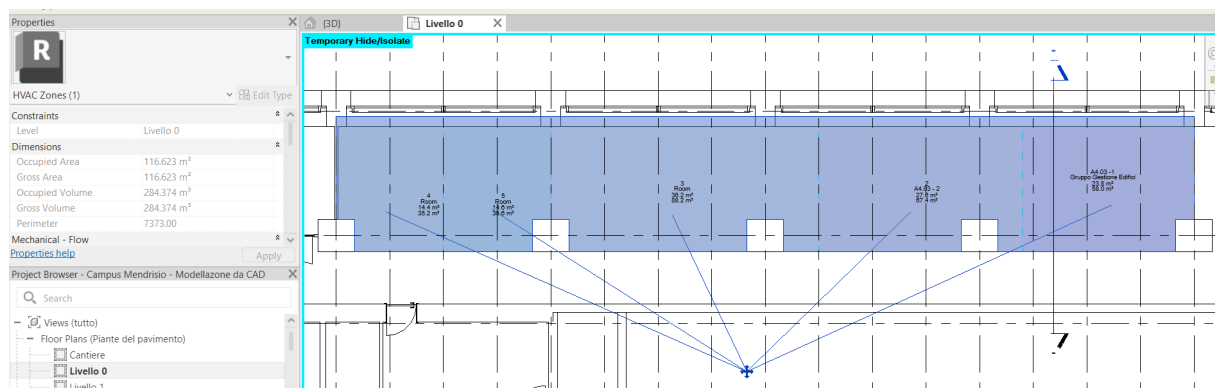


Fig. 61 Parametri modello Revit

- ZONE:
 - Dimensioni – Area e Volume
 - Room associate – Implicite nella creazione
 - Impianti – Service Type



Come evidenziato in tabella, gli elementi architettonici, seppur da modellare, non richiedono specifici requisiti: al loro interno, portano di default informazioni relative alla propria geometria, alla divisione degli spazi e ai vincoli con gli altri elementi.

Modellazione da CAD

La modellazione a partire da piante in formato .dwg è stata possibile grazie agli elaborati sviluppati durante il progetto dell'edificio: erano infatti disponibili piante, sezioni e prospetti, anche se non complete di tutte le informazioni. I file CAD sono stati integrati con immagini e video del sopralluogo, così da poter definire la distribuzione degli arredi e le altre informazioni non presenti sui CAD.

La modellazione è stata sviluppata da due utenti differenti, con livelli di esperienza diversi, e i risultati sono stati confrontati per poter comprendere la necessità o meno di affidare il processo a operatori esperti, rapportando i tempi di modellazione ai mq e analizzando il livello di dettaglio raggiunto.

Modellazione utente esperto

Una volta importato il CAD su Revit, si è proceduto alla modellazione del quarto piano nella sua interezza: dato che l'ottimizzazione scelta era di gestione spazi e non di ottimizzazione consumi, le pareti, il soffitto e il pavimento sono stati modellati come componenti generici, senza specificare stratigrafia e materiale.

Per i serramenti si è ricorso alla creazione di famiglie dedicate, specialmente per quanto riguarda le finestre, così da permettere un raffronto visivo diretto con le immagini dello stato di fatto e una migliore comprensione degli spazi considerati.



Fig. 62 Confronto tra finestre modellate e reali

La lettura del CAD è risultata talvolta complicata e, specialmente per la modellazione del soffitto e la posizione delle finestre, ha richiesto un continuo raffronto con le immagini e i video acquisiti durante le visite e i prospetti disponibili; purtroppo non sono state fornite sezioni riguardo la porzione considerata nel case study, comportando la necessità di utilizzare i prospetti per definire le dimensioni in altezza degli spazi. Non è stato invece possibile determinare la posizione e dimensione degli arredi attualmente presenti.

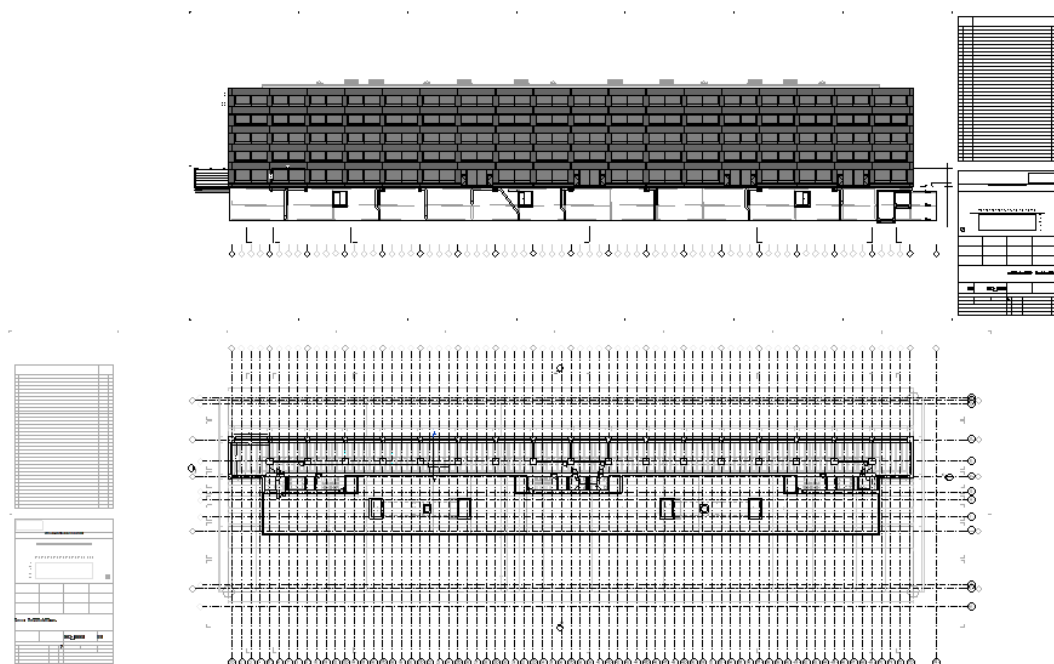


Fig. 63 Utilizzo del prospetto per modellare le altezze

La modellazione è stata quindi integrata con una nuvola di punti: si sono così potute definire le altezze interne, la connessione tra travi e pilastri e la disposizione degli arredi; questi ultimi

sono stati inseriti con dimensioni corrette ma a un livello di dettaglio baso, sempre in relazione ai requisiti individuati nelle fasi precedenti.

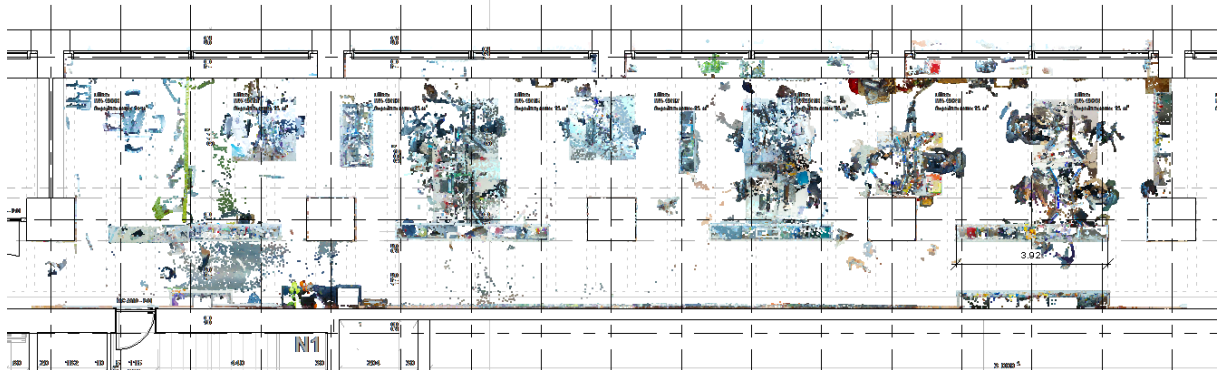


Fig. 64 Confronto tra modello e nuvola di punti: Scan-vs-BIM

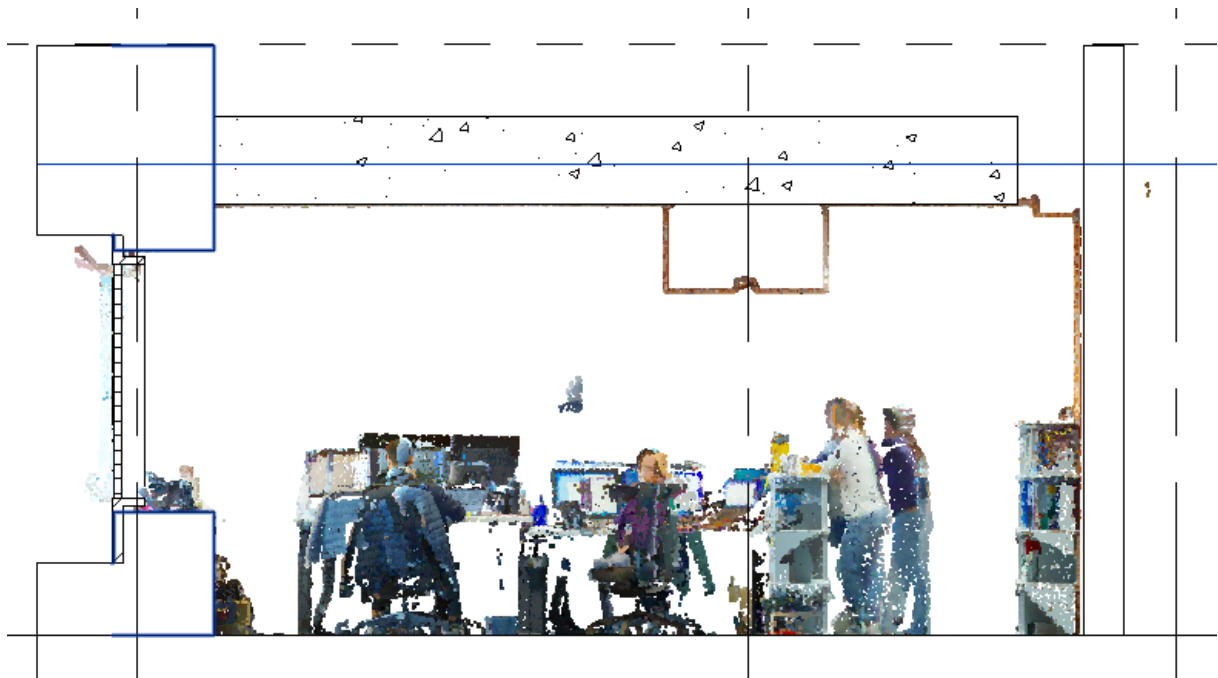


Fig. 65 Definizione delle altezze interne grazie alla nuvola di punti

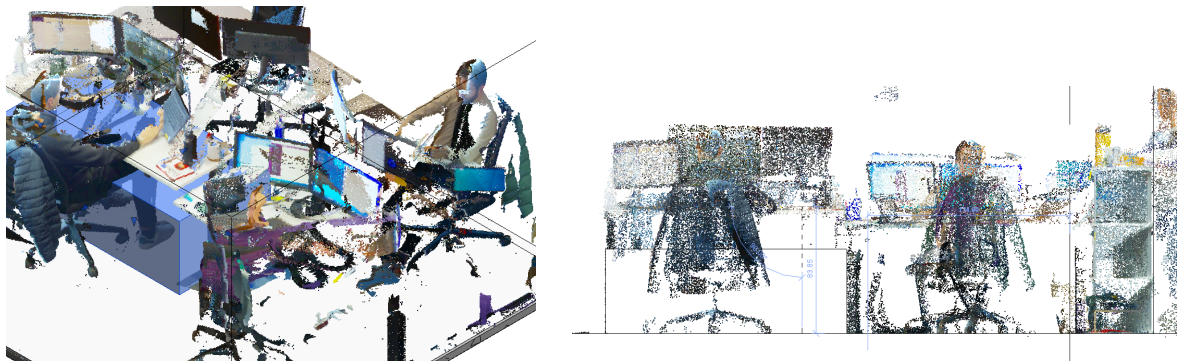


Fig. 66 Definizione degli arredi grazie alla nuvola di punti

Il confronto con la nuvola di punti non solo ha permesso di acquisire le informazioni mancanti ma ha anche evidenziato incongruenze tra le piante CAD e lo stato di fatto: in particolare, relativamente alla porzione di piano analizzata, la sala riunioni si trova spostata di sue campate rispetto alla sua reale posizione (nella Fig. 67 in rosso la posizione da CAD e in blu quella reale). La modellazione è stata quindi aggiornata seguendo le informazioni corrette.

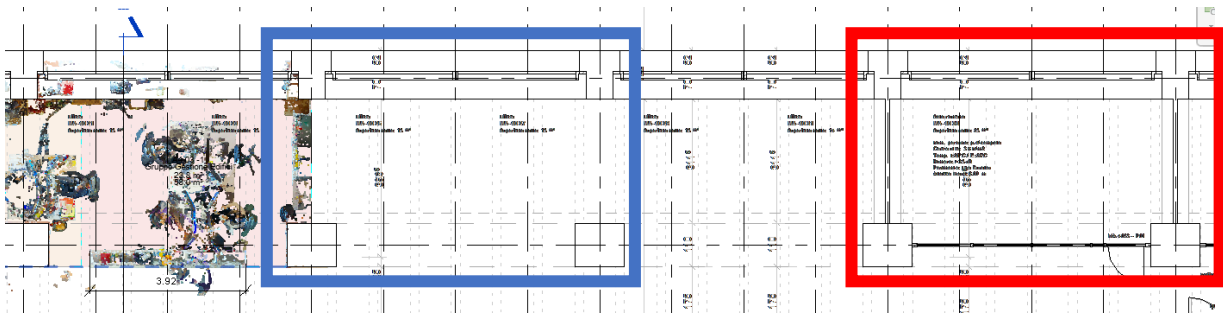


Fig. 67 Incongruenze tra realtà e piante fornite

Per raggiungere il risultato finale (arredi e serramenti custom, modellazione dell'intero piano e definizione delle altezze interne) sono servite circa sei ore di lavoro.

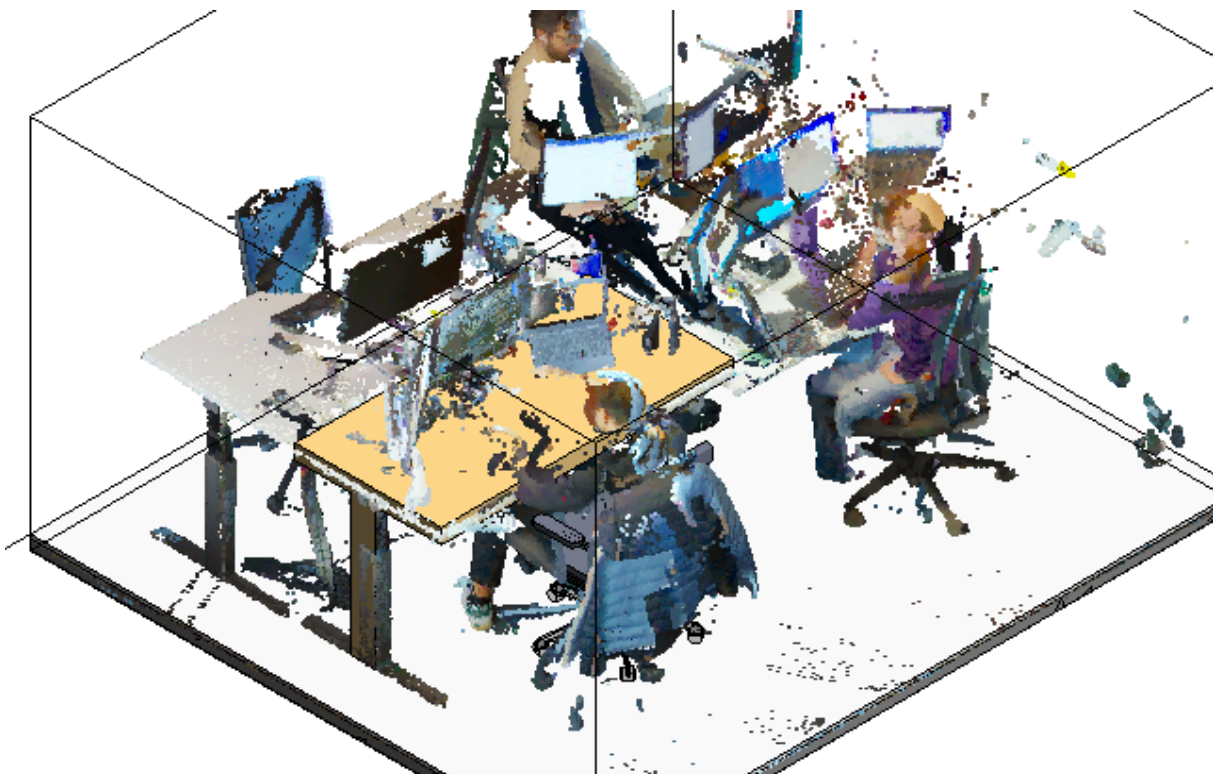


Fig. 68 Arredi modellati

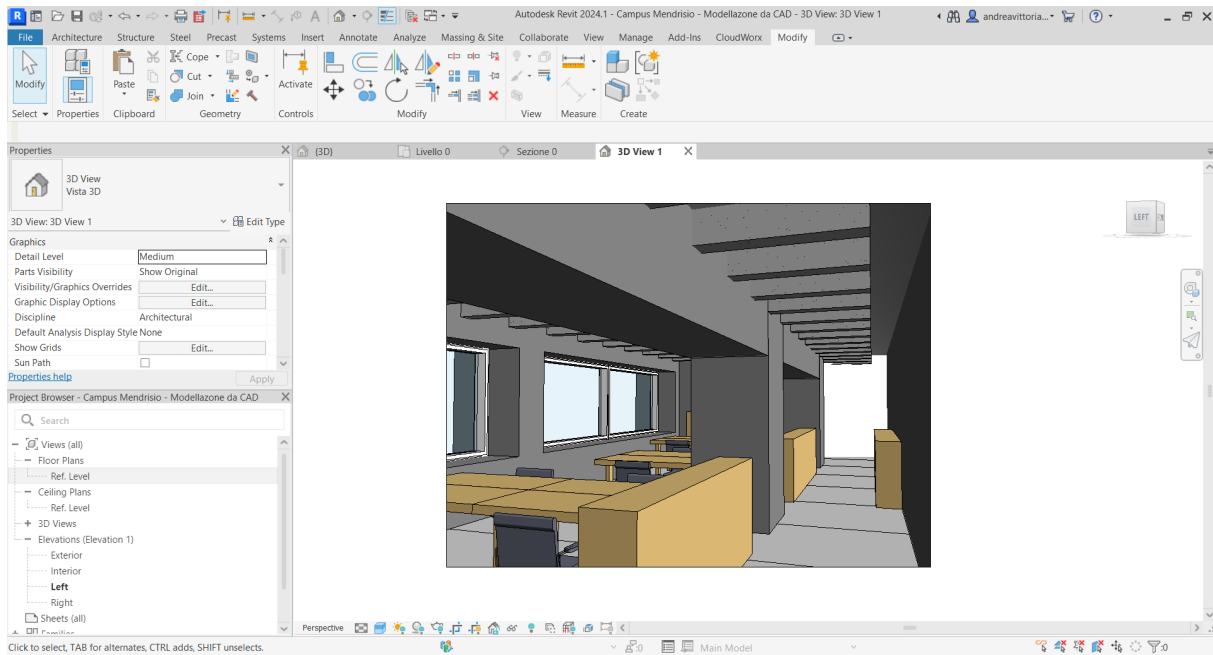


Fig. 69 Modellazione da CAD

Modellazione utente non esperto

La modellazione è stata condotta con le stesse modalità, a partire dal file CAD importato: ancor più che per quanto riguarda l'operatore con più esperienza sono state incontrate diverse criticità. In particolare:

- La pianta è risultata di difficile comprensione in quanto piena di dettagli non funzionali alla modellazione e numerose linee non sempre chiare; il prospetto fornito, inoltre, è risultato, secondo l'operatore, mancante di qualsiasi elemento utile alla modellazione eccezion fatta per la dimensione delle finestre;
- La mancanza della sezione nel punto considerato ha reso difficile determinare l'altezza precisa del piano e perciò tutti gli elementi verticali sono stati modellati a secondo considerazioni dell'operatore
- Difficoltà nel comprendere la giunzione tra gli elementi del controsoffitto e conseguente semplificazione con l'eliminazione di elementi di dettaglio

Infine, tutti gli arredi sono stati importati direttamente dalle librerie di Autodesk Revit, senza che fossero personalizzati sul progetto corrente; per quanto riguarda finestre e porte, sono state utilizzate famiglie standard con modifiche elementari, al fine di renderle più simili alla geometria reale.

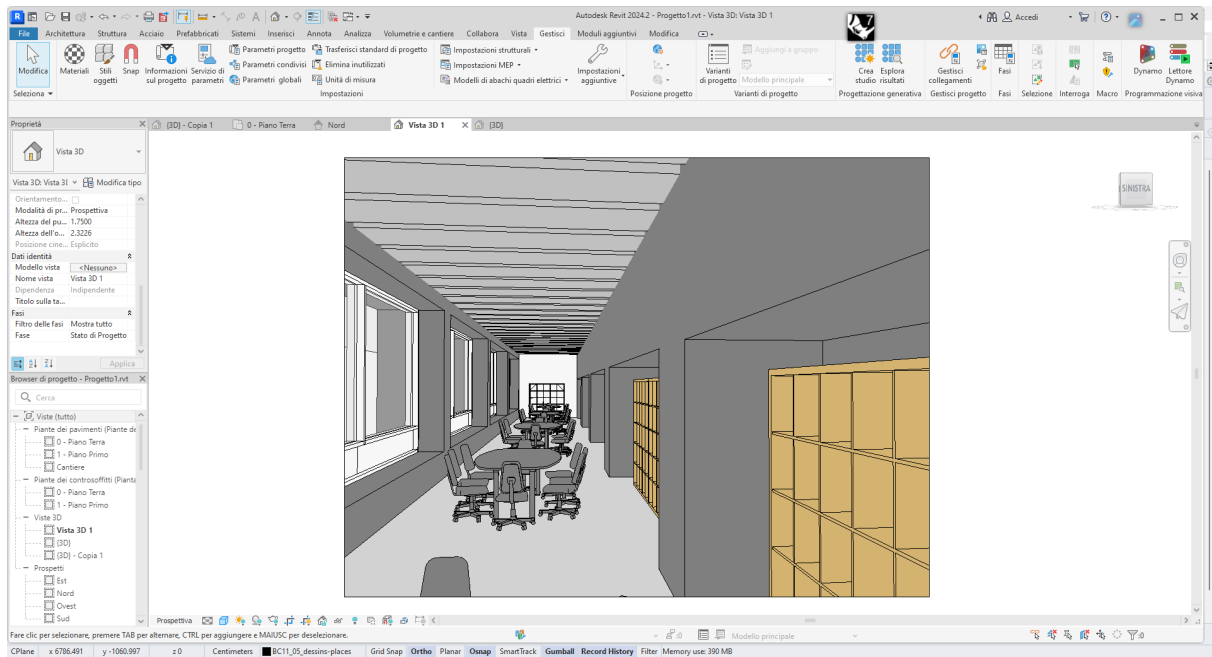


Fig. 72 Spazio modellato

Modellazione da nuvola di punti

Importando una nuvola di punti ripulita in formato .rcp in Revit è possibile utilizzarla come base per la modellazione: il software, infatti, riconosce i punti come ancoraggi e permette di utilizzarli come snap. Ciò consente di modellare direttamente sulla nuvola importata, evitando di dover segnare tutte le misure con tecniche di rilievo classiche.

Al contrario della modellazione da CAD, però, il software riconosce come ancoraggio tutti i punti, e non solo il perimetro degli elementi: sta quindi all'esperienza e alla precisione del modellatore capire quali punti considerare, portando a possibili incongruenze tra il lavoro di persone diverse. La possibile incongruenza è evidenziata nell'immagine 68: il pilastro ha infatti misura reale di 1.25 m; modellando da nuvola però, la misura viene compresa tra 1.23 m e 1.25 m, a seconda del punto considerato come snap. Considerata l'ottimizzazione oggetto del caso di studio un errore di un cm viene considerato accettabile e perciò la modellazione da nuvola di punti una metodologia valida, considerato che Revit percepisce comunque i piani definiti nella nuvola come snap (Fig. 74).



Fig. 73 Differenze tra misurazione effettuata sulla nuvola e misura reale



Fig. 74 Piano della parete riconosciuto come snap

Per il caso di studio la modellazione a partire da nuvola di punti è stata effettuata su entrambe le metodologie di acquisizione, laser statico e laser portatile, così da poterle confrontare: come già evidenziato, infatti, il laser portatile diminuisce notevolmente i tempi di acquisizione e il peso dei file di scambio ma comporta anche la registrazione di un ridotto numero di punti e l'impossibilità di ricostruire fedelmente dettagli, data la minore precisione del risultato.

Per quanto riguarda il livello di dettaglio necessario ai parametri individuati, non sono state rilevate differenze significative tra la modellazione da nuvola di punti acquisita con laser statico e con laser portatile.

Modellazione da mesh

La mesh estratta dal file di pulizia può essere importata in Revit tramite la creazione di un Model in Place di tipo Massa: la modellazione di muri e pavimenti da superficie, infatti, è possibile solo utilizzando come riferimento gli elementi massa.

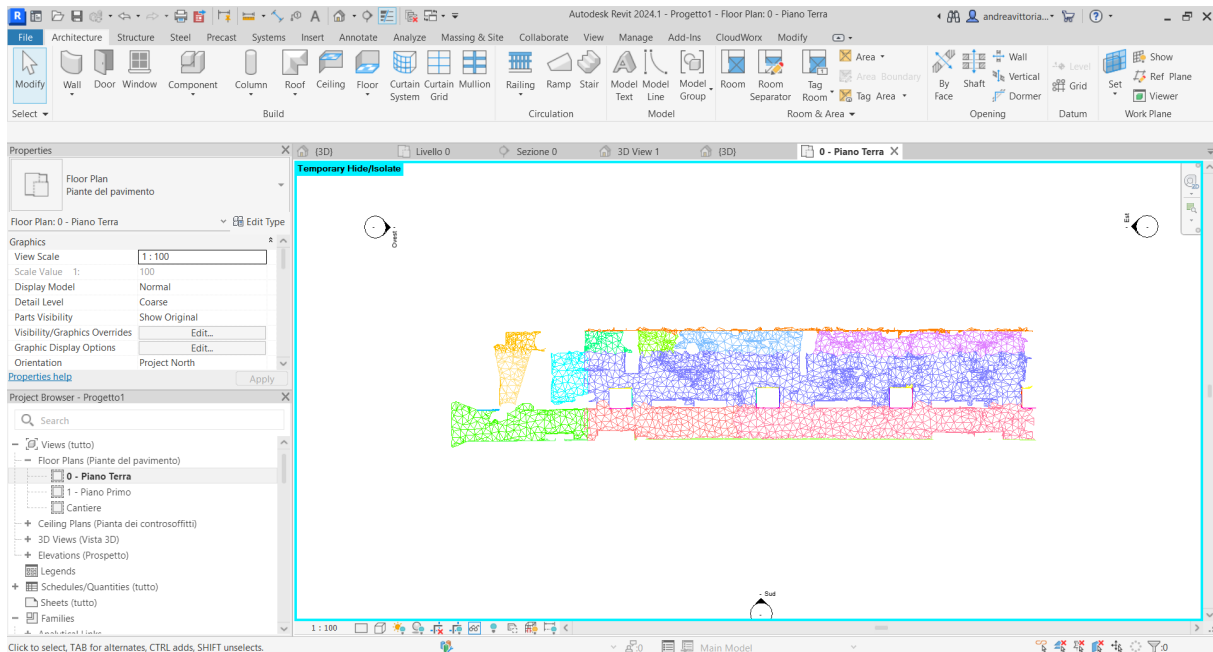


Fig. 75 Mesh importata su Revit

La principale difficoltà riscontrata nella modellazione è stata l'effettivo riconoscimento dei piani della mesh: riuscire a ottenere delle superfici sufficientemente complanari da essere riconosciute da Revit ha comportato un notevole impegno di pulizia e ottimizzazione della nuvola di punti, nonché diversi tentativi successivi.

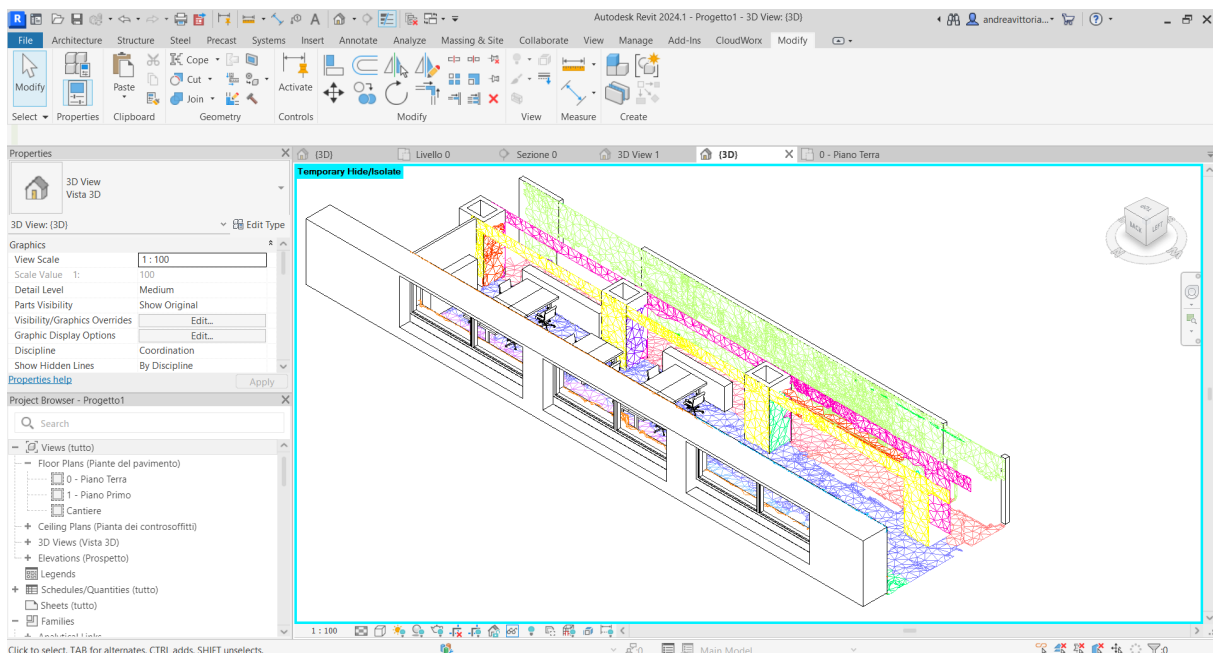


Fig. 76 Modellazione da Mesh

Una volta esportata la mesh definitiva, la modellazione procede poi rapidamente e automaticamente, consentendo una di velocizzare la parte rimanente del processo: è stata

infatti richiesta una modellazione di tipo più tradizionale solo per i serramenti o gli elementi di maggior dettaglio, comunque pochi per gli obiettivi di ottimizzazione individuati.

Ulteriore criticità è data dal fatto che la modellazione da superfici riconosce gli elementi solo per la loro parte libera e al netto di eventuali aperture: la presenza di arredo crea quindi delle discontinuità (in rosso) e gli elementi pieni come i pilastri sono automatizzabili solo separando le quattro superfici che li compongono (in blu).

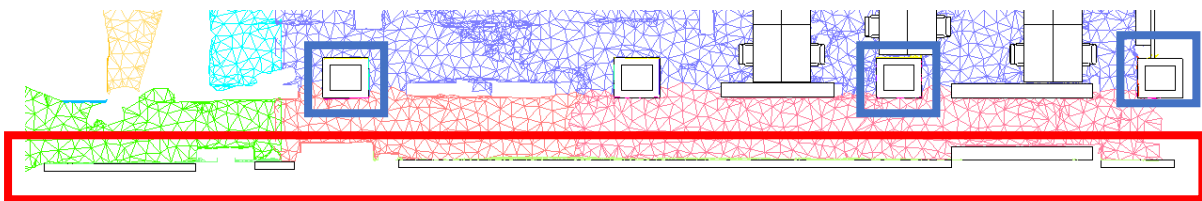


Fig. 77 Discontinuità

7.4. Confronto dei risultati















I risultati della modellazione, condotta attraverso le diverse metodologie, sono stati confrontati e valutati sulla base di sette parametri, permettendo così di implementare la soluzione ottimale in relazione agli obiettivi e le necessità di progetto.

I parametri considerati sono:

- **Disponibilità della strumentazione:** questo parametro tiene in conto quanto sia accessibile la strumentazione necessaria all'acquisizione, sia in termine di costo che di diffusione;
- **Formazione necessaria degli operatori coinvolti:** per quanto velocizzino il processo di modellazione, certi strumenti richiedono studio o esperienza pregressa, non sempre disponibili o presenti all'interno dell'organizzazione;
- **Facilità di registrazione e importazione dei dati:** pensando a un processo organico, è importante che le informazioni acquisite siano compatibili con diversi software e non richiedano numerosi o complicati passaggi prima di poter essere utilizzate;
- **Comprensibilità dei dati importati:** non sempre le informazioni acquisite sono complete o di facile comprensione, portando a difficoltà nel processo o a doversi riferire a figure più esperte;

- **Precisione della modellazione rispetto all'As-Built:** uno degli obiettivi del processo è ottenere una rappresentazione quanto più attendibile e completa dello stato di fatto e non tutte le soluzioni proposte permettono di raggiungere lo stesso livello di dettaglio;
- **Automazione del processo:** tanto più è automatico il processo tanto meno servirà impegno da parte dell'operatore, permettendo di svolgere la modellazione con più precisione a parità di esperienza;
- **Velocità processo:** in questo parametro si è tenuto conto sia della velocità di acquisizione dei dati (reperibilità, registrazione e importazione) sia della velocità, poi, di modellazione.

Viene di seguito riportato uno schema riassunto dei risultati ottenuti, con i relativi parametri.

Modellazione da CAD		Nuvola da laser statico	
	● ● ● ● ●		● ● ● ○ ○
	● ● ● ● ○		● ● ● ○ ○
	● ● ● ● ●		● ● ● ○ ○
	● ● ○ ○ ○		● ● ● ● ●
	● ● ● ● ○		● ● ● ● ○
	● ○ ○ ○ ○		● ○ ○ ○ ○
	● ● ● ○ ○		● ● ○ ○ ○

Nuvola da laser portatile		Nuvola da laser statico - mesh	
	● ● ○ ○ ○		● ● ● ○ ○
	● ● ● ● ○		● ● ● ● ○
	● ● ● ○ ○		● ● ● ○ ○
	● ● ● ● ○		● ● ● ● ●
	● ● ● ○ ○		● ● ● ○ ○
	● ○ ○ ○ ○		● ● ● ● ○
	● ● ● ○ ○		● ● ○ ○ ○

Modellazione da CAD

Per quanto riguarda la disponibilità della strumentazione e l'integrazione tra le informazioni acquisite e il software di modellazione, il processo basato sulle piante CAD non presenta criticità: non sono infatti necessari strumenti specifici per reperire le informazioni geometriche nei computer con caratteristiche particolari, oltre a quelle richieste per la modellazione stessa; dal punto di vista dell'integrazione poi, la relazione tra i diversi formati è automatica e non servono passaggi intermedi.

La maggior criticità è rappresentata dalla mancanza di informazioni disponibili o comunque dalla loro difficile comprensione. Sia il modellatore esperto che, ancor di più, il modellatore meno esperto, hanno riscontrato difficoltà a una prima lettura delle piante e hanno evidenziato l'impossibilità di determinare alcune caratteristiche, come l'altezza interna dei serramenti e la distribuzione e tipologia di arredi.

Ovviamente la modellazione tradizionale non prevede alcun tipo di automazione, se non il riconoscimento delle linee del CAD attraverso gli snap: le tempistiche di progetto riguardano quindi solo la fase di creazione del modello e sono perciò fortemente influenzate dall'abilità e dall'esperienza dell'operatore.

Come illustrato nei precedenti paragrafi, integrando le informazioni provenienti da CAD con nuvole di punti anche a bassa densità e sfruttando la metodologia Scan-vs-BIM, è possibile



semplificare il confronto con lo stato di fatto, integrare le varianti e ridurre le criticità, senza dover ricorrere ad ulteriore strumentazione specifica.

Modellazione da nuvola con Laser Statico

L'utilizzo di laser statico permette di ottenere dati dettagliati e precisi, con la possibilità di visualizzare l'ambiente acquisito in 3D e tramite le immagini acquisite dallo strumento: le informazioni sullo stato di fatto risultano quindi complete e facilmente comprensibili; allo stesso modo anche la modellazione risulta precisa e coerente.

La fase di acquisizione di queste informazioni risulta invece più complicata: l'operatore, infatti, oltre a essere in possesso (o a poter noleggiare) della strumentazione necessaria deve anche essere in grado di utilizzarla correttamente, per poter assicurare la completezza e il livello di dettaglio richiesti; serve perciò un certo grado di conoscenza e esperienza nell'acquisizione di nuvole di punti che non tutti gli operatori possiedono.

Anche in questo caso non vi è automazione, se non per il riconoscimento dei punti come snap per la modellazione: le tempistiche di progetto sono quindi la somma tra i tempi di acquisizione della nuvola, che dipendono dai requisiti richiesti dalla nuvola, l'abilità dell'operatore nel registrare i dati e la velocità del modellatore.

Modellazione da nuvola con laser portatile

L'utilizzo di laser portatile non permette di ottenere livello di dettaglio, con la possibilità, comunque, di visualizzare l'ambiente acquisito in: le informazioni sullo stato di fatto risultano quindi complete e facilmente comprensibili seppur con precisione dell'ordine del centimetro; allo stesso modo anche la modellazione risulta precisa e coerente.

La fase di acquisizione di queste informazioni risulta estremamente rapida (basti pensare che il piano acquisito è stato registrato in meno di 5 min): l'operatore, però, deve essere in possesso di uno strumento specifico, ancora molto costoso e diffuso vista la sua recente introduzione sul mercato; è inoltre necessario certo grado di conoscenza e esperienza nell'acquisizione di nuvole di punti che non tutti gli operatori possiedono, per assicurare la registrazione di tutte le informazioni necessarie.

Anche in questo caso non vi è automazione, se non per il riconoscimento dei punti come snap per la modellazione: le tempistiche di progetto sono ancora la somma tra i tempi di acquisizione della nuvola, in questo caso molto inferiori, l'abilità dell'operatore nel registrare i dati e la velocità del modellatore.

Modellazione da mesh

La modellazione da mesh prevede l'utilizzo di laser scanner statico, che permette di ottenere dati dettagliati e precisi, con la possibilità di visualizzare l'ambiente acquisito in 3D e tramite le immagini acquisite dallo strumento: le informazioni sullo stato di fatto risultano quindi complete e facilmente comprensibili.

La fase di acquisizione di queste informazioni, come per la modellazione da laser statico, risulta legata a diversi fattori: l'operatore, infatti, oltre a essere in possesso della strumentazione necessaria deve anche essere in grado di utilizzarla correttamente, per poter assicurare la completezza e il livello di dettaglio richiesti, ancora maggiore dovendo ottenere una mesh il più possibile complanare; serve perciò un certo grado di conoscenza e esperienza nell'acquisizione di nuvole di punti che non tutti gli operatori possiedono.

Criticità vera del processo è l'estrazione della mesh che, se l'utente non è esperto, va a influenzare notevolmente i tempi associati alla metodologia: è importante, ancor più che per le altre soluzioni, affidarsi a operatori esperti e in grado fornire indicazione precise nella fase di acquisizione e operare poi velocemente per quanto riguarda la registrazione.

I tempi complessivi sono comunque confrontabili con gli altri metodi, in quanto la modellazione risulta velocizzata dalla possibilità di semi automatizzare il riconoscimento degli elementi architettonici principali e affidabile anche a un modellatore con meno esperienza.

L'immagine 78 riassume il paragrafo, presentando un confronto diretto tra le diverse metodologie: i parametri presentano valori da 1 a 5 e maggiore è l'area coperta dalla polilinea maggiore è l'efficienza del processo.

Per il caso studio presentato la soluzione ottimale è quella data dall'integrata delle piante CAD con la nuvola di punti: bisogna ricordare però che, per questa metodologia, le tempistiche e la

precisione della modellazione dipendono in larga scala dall'abilità dell'operatore (come evidenziato dalla descrizione delle modellazioni dei due diversi operatori). In condizione differenti, perciò, la soluzione ottimale potrebbe differire.

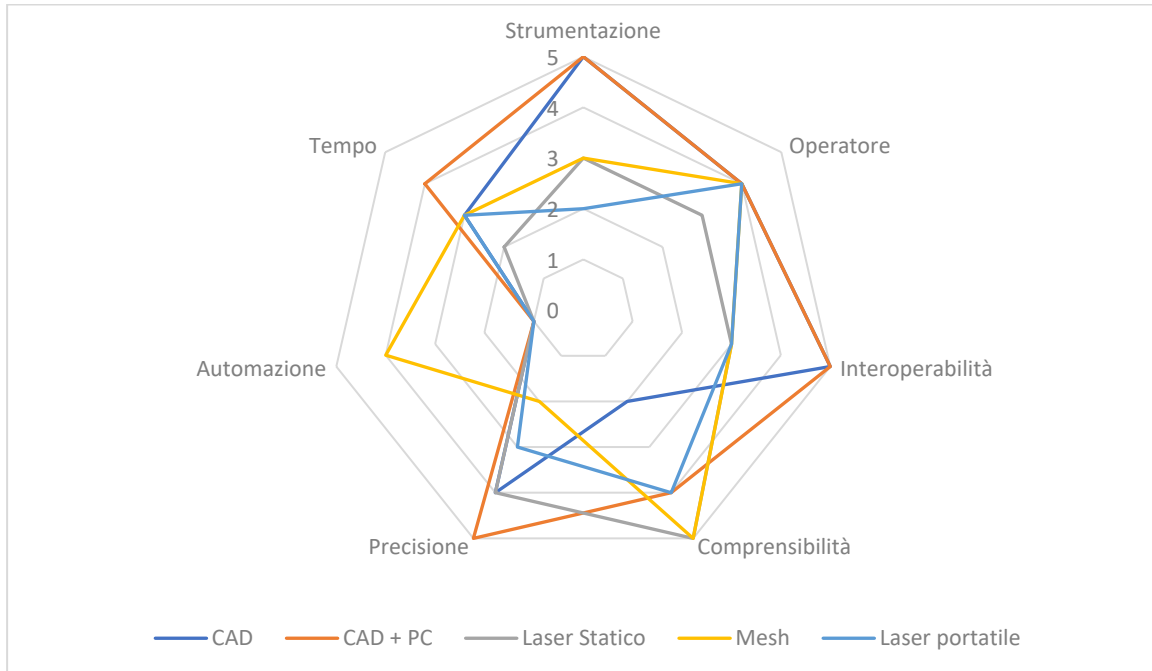


Fig. 78 Confronto tra le diverse metodologie di modellazione

7.5. Considerazioni

Dal confronto dei risultati è possibile ricavare una stretta dipendenza della soluzione ottimale rispetto agli operatori coinvolti nel processo, all'accessibilità dell'edificio in oggetto e all'impostazione generale del processo.

Il metodo più preciso a livello di risultato finale è quello basato sulle piante CAD, potendo contare su misure che hanno elevata accuratezza, specialmente per quanto riguarda edifici progettati dopo l'avvento della tecnologia CAD. Le piante disponibili, però, non sempre riportano l'ultimo aggiornamento dello stato di fatto, come è successo anche per il caso di studio: è necessario quindi che l'operatore adibito abbia la possibilità di visitare personalmente l'edificio e che siano disponibili una grande quantità di foto e video per individuare le varianti e ricostruire le informazioni disponibili. Inoltre, come evidenziato dalle problematiche riscontrate dal modellatore meno esperto, non sempre la comprensione di elaborati depositati è immediata, richiedendo un confronto continuo tra le parti interessate.

Le problematiche legate alla poca chiarezza trovano una possibile risoluzione nell'abbinare la modellazione tradizionale a tecniche innovative di scansione, usando la nuvola di punti non come base ma come confronto (Scan-vs-BIM) e consentendo l'acquisizione delle informazioni mancanti: come presentato nel caso studio, la nuvola di punti acquisita per lo Scan-vs-BIM richiede un livello di precisione inferiore rispetto al processo di Scan-to-BIM, consentendo perciò l'utilizzo di strumenti meno raffinati e più accessibili, come l'acquisizione attraverso mobile device grazie alla tecnologia LiDar, ormai prevista di default nei telefoni e tablet di ultima generazione e di fascia alta. Lo scarso livello di dettaglio ottenibile con questa acquisizione richiede, però, che l'operatore abbia ben chiare le finalità della modellazione e i requisiti richiesti, così come i punti critici su cui non sono disponibili informazioni in altra forma; inoltre, vista la necessità di registrazione manuale dei dati, l'operatore deve possedere anche una certa esperienza in materia.

Considerato quanto detto, la modellazione a partire dagli elaborati CAD e integrata con informazioni provenienti dallo Scan-to-BIM o da rilievi eseguiti personalmente è la soluzione ottimale nel caso in cui il lavoro sia eseguito da un unico operatore esperto, dal momento che la sua efficienza dipende dalla necessità di avere presenti tutti i requisiti e le informazioni necessarie.

Non sempre però è possibile affidare l'intero processo a un'unica figura all'interno dell'organizzazione, specialmente considerate le competenze richieste: la modellazione attraverso mesh consente di automatizzare parte del processo e poter quindi sfruttare anche operatori meno esperti. Affinché il processo risulti efficace, però, è necessaria una stretta collaborazione tra colui che acquisisce la nuvola di punti, chi genera la mesh e chi andrà poi a sfruttare questa mesh per la modellazione: definire le modalità di registrazione e la quantità di informazioni desiderate dalla nuvola di punti richiede infatti una visione completa del processo, così da poter assicurare l'implementazione di tutti i parametri richiesti dai requisiti individuati per l'ottimizzazione.

Questa metodologia risulta quindi efficace nel caso in cui il processo sia portato avanti da più attori, legati però da una stretta collaborazione: questo consente a ognuno di loro di non dover acquisire esperienze in ogni disciplina del processo ma di poter comunque ottenere tutte le informazioni necessarie all'interno dell'omogeneità del flusso di lavoro.

La presente tesi ha analizzato il processo dal punto di vista di un'unica organizzazione in grado di sviluppare il lavoro in tutte le sue fasi: lo stato attuale dell'industria delle costruzioni, però, non è ancora orientato verso questa visione olistica del progetto. Ciò comporta l'impossibilità di riuscire a implementare con frequenza innovazioni tecnologiche che, come visto in precedenza, richiedono un elevato grado di collaborazione; inoltre, la frammentazione dei processi tra diversi attori porta alla perdita di informazioni, come ad esempio successo nella metodologia basata sulla modellazione da CAD in cui le piante riportavano uno stato differente dal costruito.

Allo stato attuale dell'industria, perciò, il sistema che comporta un rapporto più efficiente tra tempi, capacità dell'operatore e attendibilità dei risultati finali, è lo sviluppo di modelli BIM, e il conseguente gemello digitale, a partire dall'acquisizione di nuvole di punti dettagliate: in questo caso, infatti, pur rimanendo necessaria una condivisione di obiettivi e la definizione a priori dei requisiti necessari a ogni fase del processo, agli operatori non è richiesta una visione completa del progetto, di difficile ottenimento quando a collaborare sono organizzazioni differenti, in diverse fasi a livello di implementazione delle innovazioni.

8 Conclusioni

L'avvento di nuove tecnologie e la possibilità di integrarle fra loro per ottenere un processo olistico e omogeneo si pone come base per una gestione del patrimonio esistente sempre più basata su dati attendibili e continuativi e meno sull'esperienza personale dei fruitori degli spazi. Inoltre, lo sviluppo di sistemi di automazione del processo consente di svincolarsi dall'abilità dell'operatore e permette una completa collaborazione tra le parti coinvolte, facilitando la comunicazione e lo scambio di informazioni.

Per poter implementare queste tecnologie, però, è necessaria un'attenta analisi dei processi del settore delle costruzioni come li conosciamo, spingendo gli operatori interessati ad un profondo aggiornamento che porti ad una modernizzazione sostanziale dell'impresa; il focus dei lavori non può più mirare ad una specifica metodologia ma deve ampliare i propri orizzonti verso la definizione di obiettivi e finalità di lungo termine, individuando così di volta in volta la soluzione più efficiente.

Il processo sviluppato nella tesi - volta ad ottimizzare la gestione degli spazi per uffici attraverso l'integrazione delle tecnologie Building Information Modeling (BIM) e Internet of Things (IoT) - culmina nella realizzazione concettuale di un Digital Twin predittivo. La ricerca ha attraversato il complesso panorama del settore delle costruzioni, analizzando il processo dalle fasi iniziali di acquisizione dei dati fino alla modellazione dettagliata degli elementi architettonici e alla loro integrazione con i sensori IoT: l'elaborato non è stato semplicemente un esercizio tecnico, ma un'indagine sul potenziale delle tecnologie all'avanguardia per ridefinire la gestione e l'ottimizzazione di edifici esistenti. La ricerca ha dimostrato la fattibilità della creazione di un Digital Twin, che serva come strumento per il facility management, fornendo una visualizzazione chiara e facilmente accessibile dello sviluppo dei dati e delle loro implicazioni sull'utilizzo dello spazio e sulle prestazioni dell'edificio.

La metodologia sviluppata attraverso questa tesi enfatizza le possibilità di automazione nella modellazione e un approccio strategico all'integrazione dei sensori, evidenziando il potenziale per significativi miglioramenti di efficienza nella gestione degli edifici.



Un punto focale del lavoro è stato il case study relativo al campus SUPSI a Mendrisio, che ha applicato la metodologia sviluppata a uno scenario reale: questa applicazione pratica ha rivelato le sfide e le opportunità insite nel processo, dall'acquisizione di nuvole di punti utilizzando tecnologie varie alla definizione di dettagli di modellazione dettati dalle specificità dell'edificio in questione. L'analisi comparativa dei risultati ottenuti attraverso differenti approcci tecnologici ha fornito preziose intuizioni sull'adattabilità e scalabilità del sistema proposto.

Analizzando lo sviluppo della ricerca, emergono diversi punti chiave. In primo luogo, l'integrazione delle tecnologie BIM e IoT ha un enorme potenziale per l'ottimizzazione della gestione degli spazi per uffici. Tuttavia, la realizzazione di questo potenziale richiede una attenta considerazione dei fattori tecnologici, procedurali e umani coinvolti. In secondo luogo, lo sviluppo di un Digital Twin è un processo poliedrico che richiede una profonda comprensione sia degli strumenti digitali a nostra disposizione sia degli spazi fisici che mirano a replicare. In terzo luogo, il caso studio ha sottolineato l'importanza dell'adattabilità e flessibilità nell'applicare la metodologia sviluppata a diversi edifici e condizioni.

Infine, con uno sguardo al futuro, le basi poste da questa tesi aprono diverse vie per successive ricerche. L'esplorazione delle analisi predittive all'interno del framework del Digital Twin presenta un'area promettente per migliorare le capacità decisionali dei facility management. Inoltre, l'integrazione di ulteriori fonti di dati e l'espansione delle reti di sensori potrebbero arricchire il Digital Twin, fornendo una visione più completa delle prestazioni dell'edificio e del benessere degli occupanti. Infine, la replica della metodologia sviluppata su un più ampio spettro di tipologie edilizie e scenari operativi convaliderebbe la sua scalabilità e adattabilità, contribuendo al suo perfezionamento ed evoluzione.

Vorrei concludere la mia tesi con un estratto dal Dizionario dell'Occidente Medievale dello storico francese Jacques Le Goff, che spiega come in certi momenti storici, ciclicamente, un'idea prende corpo e ...

Mi è parso un compendio già scritto e perfetto per descrivere il valore, il progresso che l'integrazione tra BIM e IoT potrà portare nel settore AEC nei prossimi anni.



Il Medioevo è stato uno dei più grandi momenti di creazione per l'Occidente, forse il più importante, il più decisivo. Una di queste creazioni fu "il lavoro". Come "valore" iniziò a prendere corpo un'idea, che non aveva ancora raggiunto la sua forma definitiva, quella di "progresso" (che assume la sua accezione e dimensione attuali solo alla fine del 1600). Questa idea poteva essere riconosciuta più propriamente nel termine "crescita".

Due settori conobbero una spinta straordinaria: l'edilizia ed il tessile. Ciò fu favorito dal diffondersi di alcune macchine, intese sempre più come strumenti di lavoro: il mulino ad acqua, il mulino a vento, il telaio orizzontale che sostituì il vecchio telaio verticale, e l'arcolaio, che consentì di filare cinque volte più velocemente che con i fusi.

L'accelerazione del lavoro, la sua più accurata divisione, un certo grado di razionalizzazione e di laicizzazione condussero a profondi mutamenti nell'idea e nell'uso del "tempo del lavoro". Accanto alle campane religiose dei conventi e delle chiese si affiancò il rintocco di quelle delle torri laiche. «Accanto al tempo della Chiesa, sia affermò il tempo del mercante».

In epoca medievale si creò, quindi un contraddittorio di non facile soluzione, attorno ai due concetti di tempo e lavoro.

La disamina di Le Goff risulta più che mai attuale anche se basata su temi dialettici di ben altra natura. Del resto, la mia formazione classica mi porta talvolta ad allontanarmi dai più rigidi schemi tecnici e scientifici per intraprendere percorsi vagamente umanistici anche laddove la tecnologia dovrebbe essere padrona.

Ma sarà facile capire il senso della citazione con poche, piccole alterazioni. Basterà sostituire gli strumenti di lavoro medievali come il mulino ad acqua, il telaio orizzontale e l'arcolaio con le nuove tecnologie integrate BIM ed il gemello digitale, e riconoscere il CAD e la progettazione tradizionale come l'allora obsoleto telaio verticale; le campane religiose dei conventi sono le nostre imprese edili tradizionali che non tengono il passo del cambiamento ma continuano a convivere, arrancando, con 'il tempo del mercante', da intendersi come il tempo in cui la tecnologia, resa fruibile e condivisa, porterà l'industria delle costruzioni alla competitività

agognata (in termini di tempo, profitti e sostenibilità), sfida quantomai affascinante nel presente e nel prossimo futuro.

Riferimenti

- Abubaker Basheer Abdalwhab Altohami, N. A. (2021). Investigating Approaches of Integrating BIM, IoT, and Facility Management for Renovating Existing Buildings: A Review.
- Adam Thelen, X. Z. (2022). A comprehensive review of digital twin - part 1: modeling and twinning enabling technologies. *Structural and Multidisciplinary Optimization* .
- Ahmed, S. (2018). Barriers to Implementation of Building Information Modeling (BIM) to the Construction Industry: A Review. *Journal of Civil Engineering and Construction*.
- AIDAN FULLER, Z. F. (2020). Digital Twin Enabling Technologies, Challenges and Open Research. *IEEE Access*.
- Ali Ghaffarianhoseini, J. T. (2017). Building Information Modelling (BIM) uptake: Clear benefits, understanding its implementation, risks and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 75.
- Ali Khudhair, H. L. (2021). Towards Future BIM Technology Innovations: A Bibliometric Analysis of the Literature.
- Alibrandi, U. (2022). Risk-Informed Digital Twin of Buildings and Infrastructures for Sustainable and Resilient Urban Communities. *American Society of Civil Engineers*.
- André Borrmann, M. K. (2018). *Building Information Modeling Why What How*. Springer.
- Ankit Katiyar, P. K. (2021). A Review of Internet of Things (IoT) in Construction Industry: Building a Better Future. *International Journal of Advanced Computing Science and Engineering*, 65-72.
- Arka Ghosh, D. J. (2020). Patterns and trends in Internet of Things (IoT) research: future applications in the construction industry. *Internet of Things research*.
- Baldwin, M. (n.d.). *From LOD to LOIN*. Retrieved from PLAN: <https://en.plan.one/blog-en/from-lod-to-loin/#:~:text=ISO%2019650->



1%20introduces%20the%20term%20Level%20of%20Information,who%20define%20their%20information%20needs%20for%20project%20management.

Banfi, F. (2019). The integration of a scan-to-HBIM process in BIM application: the development of an add-in to guide users in Autodesk Revit. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-2/W11, 2019 GEORES 2019 – 2nd International Conference of Geomatics and Restoration, 8–10 May 2019, Milan, Italy.*

Banfi, F. (2019). THE INTEGRATION OF A SCAN-TO-HBIM PROCESS IN BIM APPLICATION: THE DEVELOPMENT OF AN ADD-IN TO GUIDE USERS IN AUTODESK REVIT. *2nd International Conference of Geomatics and Restoration.*

Begić, H., & Galic, M. (2021). A Systematic Review of Construction 4.0 in the Context of the BIM 4.0 Premise. *Buildings.*

Behzad Abbasnejad, M. P. (2020). Building Information Modelling BIM adoption and implementation enablers in AEC firms: a systematic literature review. *Architectural Engineering and Design Management.*

Benedict Amade, C. I. (2021). Identifying Challenges of Internet of Things on Construction Projects Using Fuzzy Approach. *Journal of Engineering, Project, and Production Management.*

Brutto, M. L. (2021). Tecniche di rilievo integrato per processi Scan-to-BIM. *GEOmedia.*

Callegaro, N., & Albatici, R. (2021). Progettazione, gestione e analisi dati per il monitoraggio energetico-ambientale degli edifici: problemi e opportunità. *ELETTRONICO*, 1127-1141.

Charles-Edouard Tolmer, C. C. (2017). Adapting LOD definition to meet BIM uses requirements and data modeling for linear infrastructures projects using system and requirement engineering. *Tolmer et al. Visualization in Engineering.*

Chiara Cimino, E. N. (2021). Review of Digital Twin applications in manufacturing. *Computers in Industry.*

- Chris Newman, D. E. (2020). Industry 4.0 deployment in the construction industry: a bibliometric literature review and UK-based case study. *Industry 4.0 deployment*.
- Concetta Semeraro, M. L. (2021). Digital twin paradigm: A systematic literature review. *Computers in Industry*.
- Danny Murguia, P. D. (2021). Systemic BIM Adoption: A Multilevel Perspective.
- David Jones, C. S. (2020). Characterising the Digital Twin: A systematic literature review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*.
- Day, M. (2021). *Autodesk Tandem – digital twins in the cloud*. Retrieved from AEC MAGAZINE: <https://aecmag.com/digital-twin/autodesk-tandem-digital-twins-in-the-cloud/>
- De-Graft Joe Opoku, S. P.-K. (2021). Digital twin application in the construction industry: A literature review. *Journal of Building Engineering*.
- Demystifying Digital Twin. (n.d.). Autodesk.
- Douglas Aghimien, C. O. (2021). Dynamic capabilities for digitalisation in the AECO sector – a scientometric review. *Digitalisation in the AECO sector*.
- Enrique Valero, F. B. (2021). Laser scanning for BIM. *Journal of Information Technology in Construction*.
- F. Bosche, C. H. (2008). Automated retrieval of 3D CAD model objects in construction range images. *Automation in Construction 17*.
- Fabrizio Banfi, R. B. (2022). Digital Twin and Cloud BIM-XR Platform Development From Scan-to-BIM-to-DT Process to a 4D Multi-User Live App to Improve Building Comfort, Efficiency and Costs. *Energies*.
- Farhadi, F. (2024). *Top 7 Digital Twin Software in 2024*. Retrieved from Neuroject: <https://neuroject.com/digital-twin-software/>
- Fei Tao, H. Z. (2019). Digital Twin in Industry: State-of-the-Art. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL INFORMATICS*.

- Felipe Mellado, P. F. (2020). Digitisation of existing buildings to support building assessment schemes viability of automated sustainability-led design scan-to-BIM process. *Architectural Engineering and Design Management*.
- Giuseppe Galbiati, F. G.-M. (2023). A modelling framework for modern heritage buildings energy simulation. *Journal of Building Engineering*.
- Gunturi, M. (2021). A review on the internet of things in civil engineering: engineering:. *E3S Web of Conferences 309, 01209*.
- Gustavo Rocha, L. M. (2021). A Survey of Scan-to-BIM Practices in the AEC Industry: A Quantitative Analysis. *International Journal of Geo-Information*.
- Hafiz Muhammad Faisal Shehzad, R. B. (2019). Building Information_Modeling Factors Affecting the Adoption in the AEC Industry.
- Hamed Nabizadeh Rafsanjani, A. H. (2023). Towards digital architecture, engineering, and construction (AEC) industry through virtual design and construction (VDC) and digital twin. *Energy and Built Environment*.
- Hamilton Lopes de Miranda Junior, N. R. (2017). The internet of things sensors technologies and their applications for complex engineering projects a digital construction site framework. *Brazilian Journal of Operations & Production Management 14*.
- Hélène Macher, T. L. (2017). From Point Clouds to Building Information Models 3D Semi-Automatic Reconstruction of Indoors of Existing Buildings. *Applied sciences*.
- Honghai Wu, P. J. (2023). A Comprehensive Review of Digital Twin from the Perspective of Total Process: Data, Models, Networks and Applications. *Sensors*.
- JAN-FREDERIK UHLENKAMP, J. B.-D. (2022). Digital Twins A Maturity Model for Their Classification and Evaluation. *Digital Object Identifier*.
- Jiaying Zhang, J. C. (2022). Digital Twins for Construction Sites: Concepts, LoD Definition, and Applications. *Journal of Management Engineering*.

- Jingbin Liu, D. X. (2021). A Survey of Applications With Combined BIM and 3D Laser Scanning in the Life Cycle of Buildings. *IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN APPLIED EARTH OBSERVATIONS AND REMOTE SENSING*.
- João Pedro Dias, A. R. (2022). Designing and constructing internet-of-Things systems - An overview of the ecosystem. *Internet of Things*.
- Jochen Teizer, M. W. (2017). Internet of Things (IoT) for Integrating Environmental and Localization Data in Building Information Modeling (BIM). *34th International Symposium on Automation and Robotics in Construction*.
- Junshan Liu, S. A. (2023). Static Terrestrial Laser Scanning (TLS) for Heritage Building Information Modeling (HBIM): A Systematic Review. *Virtual Worlds*.
- Kiran Khurshid, A. D. (2023). An In-Depth Survey Demystifying the Internet of Things (IoT) in the Construction Industry Unfolding New Dimensions.
- Leihui Li, R. W. (2021). A Tutorial Review on Point Cloud Registrations: Principle, Classification, Comparison and Technology Challenges. *Mathematical Problems in Engineering*.
- Liang Zhao, H. Z. (2021). Digital-Twin-Based Evaluation of Nearly Zero-Energy Building for Existing Buildings Based on Scan-to-BIM. *Advances in Civil Engineering*.
- M. A. Hossain, J. K. (2018). BIM for Existing Buildings: Potential Opportunities and Barriers. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*.
- M. Bonduel, M. B. (2017). SCAN-TO-BIM OUTPUT VALIDATION - TOWARDS A STANDARDIZED GEOMETRIC QUALITY ASSESSMENT OF BUILDING INFORMATION MODELS BASED ON POINT CLOUDS. *5th International Workshop LowCost 3D – Sensors, Algorithms, Applications*.
- M. Esnaashary Esfahani, E. E. (2019). Using Scan-to-BIM Techniques to Find Optimal Modeling Effort; A Methodology for Adaptive Reuse Projects. *36th International Symposium on Automation and Robotics in Construction*.
- M. Jarzabek-Rychard, H.-G. M. (2023). Modeling of 3D geometry uncertainty in Scan-to-BIM automatic indoor reconstruction. *Automation in Construction* 154.



- M. Shahinmoghadama, A. M. (2019). Review of BIM-centered IoT deployment: State of the Art, Opportunities, and Challenges. *36th International Symposium on Automation and Robotics in Construction*.
- Mansour Esnaashary Esfahani, C. R. (2021). Quantitative investigation on the accuracy and precision of Scan-to-BIM under different modelling scenarios. *Automation in Construction 126*.
- Mathias Minos-Stensrud, O. H. (2018). Towards Automated 3D reconstruction in SME factories and Digital Twin Model generation. *18th International Conference on Control, Automation and Systems*.
- Mergen Kor, I. Y. (2021). An investigation for integration of deep learning and digital twins towards Construction 4.0.
- Michel Fett, F. W. (2023). A Literature Review on the Development and Creation of Digital Twins, Cyber-Physical Systems, and Product-Service Systems. *Sensors*.
- Min Deng, C. C. (2021). From BIM to digital twins: a systematic review of the evolution of intelligent building representations in the AEC-FM industry. *Journal of Information Technology in Construction*.
- Mina Younan, E. H. (2020). Challenges and recommended technologies for the industrial internet of things - A comprehensive review. *Measurement*.
- Mohamed Nour El-Din, P. F. (2022). Digital Twins for Construction Assets Using BIM Standard Specifications. *Buildings*.
- Mohammadsaeid Parsamehr, U. S. (2023). A review of construction management challenges and BIM-based solutions perspectives from the schedule, cost, quality, and safety management. *Asian Journal of Civil Engineering*.
- Mudan Wang, C. C. (2020). A Systematic Review of Digital Technology Adoption in Off-Site Construction Current Status and Future Direction towards Industry 4.0. *Buildings*.
- Muhammad Shahzad, M. T. (2022). Digital Twins in Built Environments: An Investigation of the Characteristics, Applications, and Challenges. *Buildings*.

- Nagajayanthi, B. (2022). Decades of Internet of Things Towards Twenty-first Century A Research-Based Introspective. *Wireless Personal Communications*.
- O. Roman, M. A. (2023). A SEMI-AUTOMATED APPROACH TO MODEL ARCHITECTURAL ELEMENTS IN SCAN TO BIM PROCESSES. *29th CIPA Symposium "Documenting, Understanding, Preserving Cultural Heritage"*.
- Obinna C. Madubuike, C. J. (2022). A review of digital twin applications in construction. *ITcon*.
- Ozturk, G. B. (2021). Digital Twin Research in the AECO-FM Industry. *Journal of Building Engineering*.
- Petra M. Bosch-Sijtsema, P. G. (2019). Professional development of the BIM actor role. *Automation in Construction 97*.
- Qi Qiu, M. W. (2022). An adaptive down-sampling method of laser scan data for scan-to-BIM. *Automation in Construction 135*.
- Qian Wang, J. G.-K. (2019). An Application Oriented Scan-to-BIM Framework.
- Qing-Jie Wen, Z.-J. R.-F. (2021). The progress and trend of BIM research: A bibliometrics-based visualization analysis. *Automation in Construction 124*.
- Qiuchen Lu, A. K. (2020). Developing a Digital Twin at Building and City Levels: Case Study of West Cambridge Campus. *ASCE*.
- Rabia Charef, S. E. (2019). Building Information Modelling adoption in the European Union: An overview. *Journal of Building Engineering 25*.
- Rabia Rashdi, J. M.-S. (2022). Scanning Technologies to Building Information Modelling: A Review. *infrastructures*.
- Rafael Sacks, I. B. (2020). Construction with digital twin information systems. *Data-Centric Engineering*.
- Rane, N. L. (2023). Integrating Leading-Edge Artificial Intelligence (AI), Internet of Things (IoT), and Big Data Technologies for Smart and Sustainable Architecture, Engineering and Construction (AEC) Industry: Challenges and Future Directions. *International Journal of Data Science and Big Data Analytics*.

- S A Adekunle, C. A. (2022). SCAN TO BIM: a systematic literature review network analysis. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*.
- S. Dilaksha, A. R. (2021). Potential of internet of things (IOT) in the construction industry. *Proceedings of the 9th World Construction Symposium*.
- Sattanino, E. (2017). I LOI NELLE SCALE DI LOD USA, UK, ITA: Analisi comparata degli attributi informativi non geometrici.
- Shayan Nikoohemata, A. A. (2020). Indoor 3D reconstruction from point clouds for optimal routing in complex buildings to support disaster management. *Automation in Construction 113*.
- Shu Tang, D. R.-B. (2019). A review of building information modeling (BIM) and the internet of things (IoT) devices integration: Present status and future trends. *Automation in Construction 101*, 127-139.
- Solomon Olusola Babatunde, D. E. (2020). Comparative analysis of drivers to BIM adoption among AEC firms in developing countries: A case of Nigeria. *AEC firms in developing countries*.
- Tareq Salem, M. D. (2023). Digital Twins for Construction Projects - Developing a Risk Systematization Approach to Facilitate Anomaly Detection in Smart Buildings. *telecom*.
- Thomas Czerniawski, F. L. (2020). Automated digital modeling of existing buildings: A review of visual object recognition methods. *Automation in Construction 113*.
- Tran Duong Nguyen, S. A. (2023). The Role of BIM in Integrating Digital Twin in Building Construction: A Literature Review.
- Tuo Feng, W. W. (2023). Clustering based Point Cloud Representation Learning for 3D Analysis.
- Usman Asad, M. K. (2023). Human-Centric Digital Twins in Industry: A Comprehensive Review of Enabling Technologies and Implementation Strategies. *Sensors*.
- V. Badenko, A. F. (2019). SCAN-TO-BIM METHODOLOGY ADAPTED FOR DIFFERENT APPLICATION.

- Valeria Croce, G. C. (2021). From the Semantic Point Cloud to Heritage-Building Information Modeling: A Semiautomatic Approach Exploiting Machine Learning.
- Valerian Vanessa Tuhaie, J. H. (2023). Technologies for digital twin applications in construction. *Automation in Construction*.
- Viorica Paștrașucean, I. A. (2015). State of research in automatic as-built modelling. *Advanced Engineering Informatics* 29.
- Wafa'a Kassab, K. A. (2020). A–Z survey of Internet of Things - Architectures, protocols, applications, recent advances, future directions and recommendations. *Journal of Network and Computer Applications*.
- Wei Hu, K. Y. (2022). Digital Twin and Industry 4.0 Enablers in Building and Construction: A Survey. *Buildings* .
- Wesam Salah Alaloul, A. H. (2021). Evolution of close-range detection and data acquisition technologies towards automation in construction progress monitoring. *Journal of Building Engineering* 43.
- Y. K. Liu, S. K. (2022). State-of-the-art survey on digital twin implementations. *Advanced Manufacturing*.
- Yaser Gamil, M. A. (2019). Internet of things in construction industry revolution 4.0: Recent trends and challenges in the Malaysian context. *Internet of things (IOT)*.
- Yiwen Wu, K. Z. (2021). Digital Twin network: a survey. *IEEE Internet of Things of Journal*.
- Zezhou WU, K. D.-A. (2022). STATUS QUO AND FUTURE TRENDS OF BIM-BASED COORDINATION RESEARCH A CRITICAL REVIEW. *Journal of Civil Engineering and Management*.
- Ziwen Liu, Y. L. (2019). A Review and Scientometric Analysis of Global Building Information Modelling (BIM) Research in the Architecture, Engineering and Construction (AEC) Industry.
- Ziwen Liu, Y. L. (2021). Transition from building information modeling (BIM) to integrated digital delivery (IDD) in sustainable building management: A knowledge discovery approach based review. *Journal of Cleaner Production* 291.

Ringraziamenti