

POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Edile

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile



**Politecnico
di Torino**

Tesi di Laurea Magistrale

**Verso il cantiere intelligente e sostenibile: sperimentazioni BIM-based e
Intelligenza Artificiale**

Relatore:

Manzone Fabio

Co-Relatore:

Del Giudice Matteo

Candidata:

Antonelli Daniela

Ottobre 2025

Sommario

Abstract	5
1. Fondamenti teorici ed applicativi.....	7
1.1. Il BIM: potenzialità e limiti.....	8
1.1.1. Gestione informativa nei progetti BIM: il ruolo dei BIM DATA.....	11
1.1.2. Interoperabilità e condivisione dei dati	13
1.1.2.1. I formati di esportazione per la condivisione dei dati	13
1.1.3. Gestione e pubblicazione del modello BIM in ambiente digitale	15
1.2. Strumenti e metodologie innovative per la gestione del cantiere: soluzioni attive a passive 16	
1.2.1. L' AI per la gestione del cantiere	16
1.2.1.1. Interazione con i modelli BIM mediante agenti conversazionali	19
1.2.2. La blockchain e la digitalizzazione dei processi costruttivi.....	23
1.2.3. Tecnologia BIM-to-field: interazione diretta tra modello e realtà	24
1.3. Individuazione della domanda di ricerca	27
1.4. ESG: principi e applicazioni nel progetto edilizio	32
1.4.1. LEED e GBC Historic Building: protocolli per l'edilizia sostenibile.....	33
2. Caso studio: la Cavallerizza Reale di Torino	35
2.1. Evoluzione storica e architettonica della Cavallerizza Reale.....	35
2.2. Il nuovo progetto	38
2.2.1. Identificazione dell'intervento	38
2.2.2. La gestione informativa.....	41
2.2.3. Il protocollo GBC HB nel cantiere della Cavallerizza Reale.....	42
3. Metodologia applicata: il Framework	45
3.1. BIMPOOL-AI: Intelligenza artificiale per la gestione dei dati BIM	46
3.1.1. Interfaccia grafica della piattaforma BimPool-AI.....	47
3.2. Il framework BIM-AI per la sostenibilità: applicazione al caso studio	49

3.2.1.	Gestione dei rifiuti da demolizione e costruzione – MR Prerequisito 2	51
3.2.1.1.	Gestione dei rifiuti da demolizione e costruzione - MR Credito 2.....	52
3.2.1.2.	Integrazione della piattaforma BimPool-AI nell'esecuzione delle analisi ..	52
3.2.2.	Riutilizzo degli edifici – MR Prerequisito 3	57
3.2.2.1.	Riutilizzo degli edifici - MR Credito 1.....	58
3.2.2.2.	Le Fasi ed i Filtri per una gestione del modello efficiente	59
3.2.2.3.	Interrogare l'AI sul modello per il calcolo delle superfici	63
3.2.3.	Ottimizzazione ambientale dei prodotti	70
3.2.3.1.	L'integrazione dell'AI per verificare la presenza di certificazioni EPD	71
3.3.	Risultati ed implicazioni pratiche nella gestione del cantiere per l'Energy Efficiency	76
3.3.1.	Key Performance Indicator	76
3.3.1.1.	Ottimizzazione dei tempi.....	76
3.3.1.2.	Accuratezza dei dati.....	79
4.	Conclusioni e sviluppi futuri.....	83
5.	Bibliografia	86
6.	Sitografia.....	88
7.	Indice delle figure	90

Abstract

Con l'ingresso nell' "Era del Digitale" e con l'introduzione dell'Intelligenza artificiale, il settore delle costruzioni si trova di fronte alla necessità di un cambio di paradigma orientato all'innovazione ed all'automazione dei processi. Il presente lavoro di tesi nasce con l'obiettivo di individuare una metodologia efficace per ottimizzare e semplificare alcuni dei processi relativi alla gestione sostenibile dei dati nella fase di cantiere.

La fase iniziale di ricerca ha previsto un benchmark metodologico nel quale sono state confrontate alcune delle principali metodologie emergenti, tra cui l'AI, la blockchain ed il field-to-Bim.

La metodologia ha preso forma attraverso il caso studio del cantiere della Cavallerizza Reale di Torino, un progetto complesso che ha come obiettivo l'ottenimento della certificazione GBC HB. In particolare, è stato sviluppato un sistema che integrando un software gestionale dotato di un tool di intelligenza artificiale, ed il modello BIM, permette di automatizzare i processi necessari per l'ottenimento di alcuni dei crediti più complessi appartenenti all'area *Materiali e Risorse* del protocollo GBC HB. Analizzando vantaggi, punti di forza e criticità, il lavoro pone le basi per un nuovo approccio alla gestione del cantiere in cui l'IA ed il BIM diventano strumenti chiave per realizzare cantieri intelligenti, digitali e sostenibili.

English Version

With the advent of the “Digital Era” and the introduction of Artificial Intelligence, the construction sector is facing the necessity of a paradigm shift aimed at innovation and the automation of processes.

This thesis aims to identify an effective methodology for optimizing and simplifying certain processes related to the sustainable management of data during the construction phase.

The initial stage of the research involved a methodological benchmark, in which several of the main emerging methodologies—such as AI, blockchain, and field-to-BIM—were compared.

The proposed methodology was developed through the case study of the construction site of the Cavallerizza Reale in Turin, a complex project whose objective is to obtain GBC Historic Building (GBC HB) certification. Specifically, a system was developed that, by integrating a management software equipped with an artificial intelligence tool and the BIM model, enables the automation of processes required to achieve some of the most challenging credits within the “Materials and Resources” category of the GBC HB protocol.

By analyzing benefits, strengths, and critical issues, this work lays the foundation for a new approach to construction site management, in which AI and BIM become key tools for realizing intelligent, digital, and sustainable construction sites.

1. Fondamenti teorici ed applicativi

Con il passare degli anni, l'intelligenza artificiale ed i sistemi automatizzati stanno diventando parte integrante della vita quotidiana, trovando applicazione nella maggior parte dei settori lavorativi con lo scopo di ottimizzare e velocizzare i processi operativi.

Il mondo delle costruzioni, tuttavia, rimane ancora molto diffidente rispetto all'adozione delle nuove tecnologie e, soprattutto in Italia, presenta un livello di maturità digitale che risulta notevolmente inferiore se paragonato al suo potenziale teorico. Nei processi seguiti durante l'iter di realizzazione di un progetto, partendo dalle varie fasi di progettazione per poi arrivare alle fasi di gestione del cantiere e di collaudo, alcune delle principali criticità che si riscontrano sono rappresentate dall'inefficienza nell'elaborazione dei dati e nella trasmissione delle informazioni, e dalla difficoltà nel creare una comunicazione efficace tra i diversi attori coinvolti. L'approccio tradizionale, basato sulla condivisione del materiale in formato cartaceo, si configura come un sistema lento e spesso accompagnato da errori di incomprensione e di coordinamento (Dalir A. H., 2025). Questi potrebbero essere ridotti con l'adozione di tecnologie all'avanguardia quali il Building Information Modeling (BIM), la blockchain, l'Internet of Things (IoT), l'Intelligenza artificiale (AI), le tecnologie BIM-to-Field, le tecniche di Machine Learning (ML) ed il Digital Twin (DT).

L'automazione dei processi porterebbe numerosi vantaggi nel settore edilizio quali: una maggiore accuratezza nei risultati; una riduzione dei bias cognitivi; un'ottimizzazione significativa dei tempi e dei costi; una risoluzione automatizzata delle procedure "meccaniche" e ripetitive; una semplificazione nei processi di comunicazione e di gestione dei dati.

Per implementare una strategia di digitalizzazione efficace e che coinvolga tutte le discipline, è necessario integrare, allo stesso tempo, soluzioni tecnologiche differenti in quanto, come si evincerà dai paragrafi successivi, ognuna di esse fornisce output specifici e risulta particolarmente adatta se adottata in determinati contesti e campi di applicazione.

Oggi, numerose ricerche e progetti sono orientati all'individuazione di strumenti e metodologie innovative finalizzate ad ottimizzare i processi edilizi, con particolare attenzione a quelli coinvolti nella fase di gestione del cantiere. In tale contesto si colloca il seguente lavoro di tesi, che si propone di analizzare le principali metodologie emergenti e contribuire nell'individuazione di soluzioni utili per la gestione del cantiere con un focus specifico sugli aspetti legati all'efficientamento energetico.

1.1. Il BIM: potenzialità e limiti

Il BIM (Building information model/modeling/management) viene definito come una metodologia innovativa finalizzata alla realizzazione di un modello digitale parametrico nel quale si possono integrare, gestire e visualizzare informazioni riguardanti l'intero ciclo di vita dell'opera: dalla progettazione alla costruzione, per poi arrivare alla manutenzione ed allo smantellamento (Liu X. & Co., 2025). L'obiettivo su cui si basa la metodologia BIM non è unicamente quello di produrre un modello tridimensionale, bensì di creare un vero e proprio modello informativo dotato di parametri, capace di integrare sia informazioni geometriche, sia dati alfanumerici utili per avere una visione completa del progetto.

L'adozione del BIM nel settore delle costruzioni, se adeguatamente implementata, permetterebbe di facilitare la collaborazione interdisciplinare, ottimizzare in modo significativo la gestione dei tempi e dei costi, migliorare la qualità progettuale e aumentare l'efficienza nella gestione dei dati e delle risorse. Sono proprio questi benefici ad aver portato all'introduzione del Nuovo Codice Appalti (D.Lgs 36/2023) che, seguendo le linee guida che erano già state anticipate nel Decreto Ministeriale n. 560 del 01/12/2017 o "Decreto Baratonò", ha introdotto l'obbligo di utilizzo del BIM per le opere pubbliche con un importo a base di gara superiore al milione di euro a partire dal 1° gennaio 2025.

Tuttavia, nonostante le potenzialità offerte, sono ancora poche le imprese che adottano il BIM per ottimizzare il flusso operativo o che lo applicano in maniera efficace. Il 7° Report OICE (Associazione delle organizzazioni di ingegneria, di architettura e di consulenza tecnico economica) sulla digitalizzazione (2024) ha riportato una serie di interviste ai propri associati in cui veniva richiesto il livello di maturità del settore edilizio con riferimento alla digitalizzazione, ed il livello di ottimizzazione previsto per gli sviluppi futuri. La media delle risposte alla prima domanda ha dato come risultato un valore pari a 5,4 considerando una scala compresa tra 1 e 10, evidenziando la consapevolezza di una maturità digitale molto bassa. Al contrario, l'output delle risposte alla seconda domanda è stato pari ad un valore di 8, mostrando un grande ottimismo nei confronti di un possibile contributo futuro della digitalizzazione nel mondo delle costruzioni. L'analisi è stata, in seguito, confermata dal report "*Analisi del livello di maturità tecnologica/digitale degli Associati ANCE*" condiviso da ANCE (Associazione Nazionale Costruttori Edile) nel mese di febbraio 2025 (ANCE, 2025) ha riportato i dati ottenuti da un sondaggio in cui veniva richiesto se l'impresa utilizzasse il sistema del BIM, con la possibilità di scegliere tra le opzioni "per niente", "poco", "abbastanza" e "molto". Il risultato

ottenuto è stato che circa il 61% delle imprese, di cui la maggioranza appartenente alla categoria delle piccole imprese¹, dichiara di non utilizzare "per niente" la metodologia BIM.

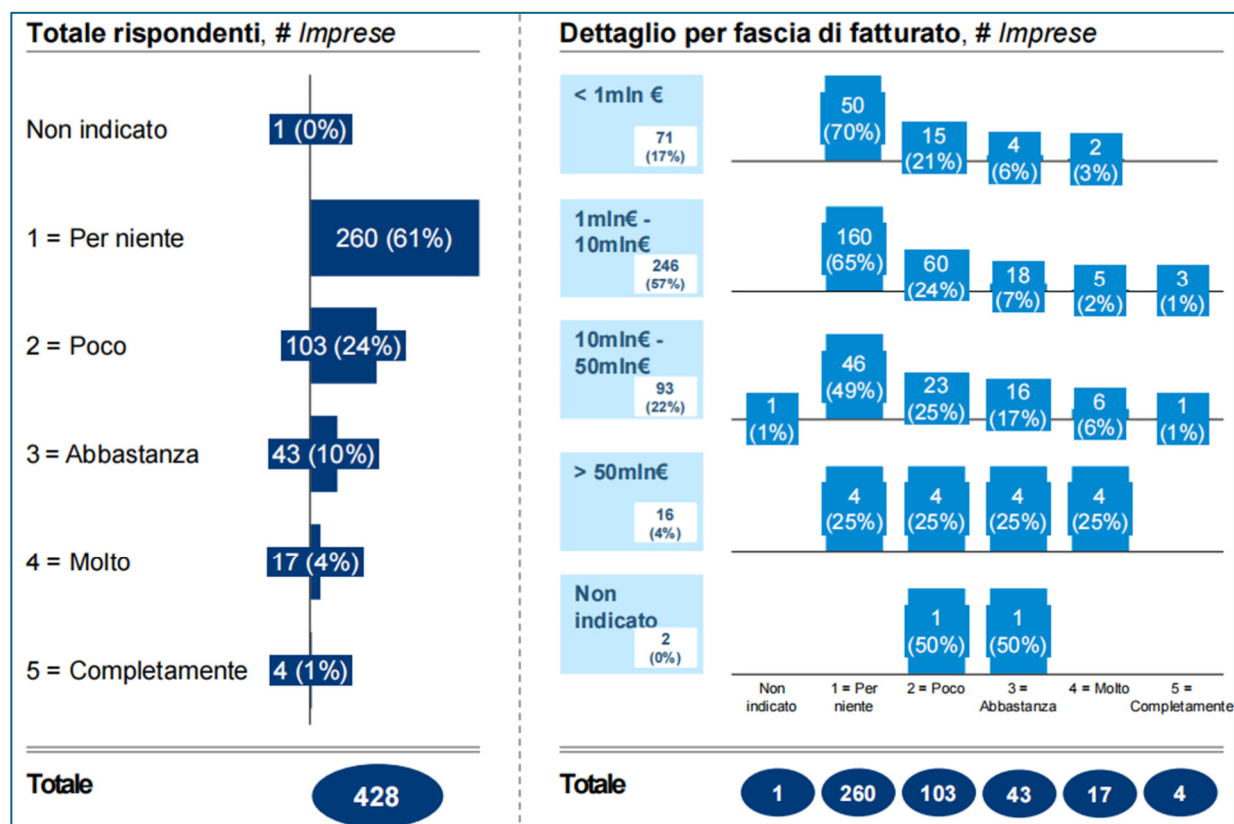


Figura 1 – Risultati del sondaggio sull'utilizzo del BIM da parte delle imprese - ANCE (2025)

Nonostante i numerosi vantaggi che il BIM sarebbe in grado di offrire e la sua crescente diffusione nel mondo dell'edilizia, esso presenta ancora diversi limiti e criticità che spingono aziende e professionisti ad adottare soluzioni tradizionali più attendibili e conformi agli standard operativi già in uso.

Tra i principali ostacoli, emergono sicuramente il tema dei tempi e dei costi. Integrare una metodologia BIM significa, infatti, investire tempo e denaro nella formazione del personale, spesso non abituato a strumenti digitali avanzati; all'acquisto di software, che richiedono licenze e aggiornamenti frequenti, e di hardware in grado di supportare processi complessi. A risentirne sono in particolare le PMI, ovvero le piccole e medie imprese che, nonostante in alcuni casi riconoscano i vantaggi del BIM, spesso non dispongono delle risorse economiche e delle competenze interne necessarie per un cambiamento di tale portata.

¹ Per imprese di piccole dimensioni si intendono quelle con fatturato con <1 mln€, da 1 a 10 mln€ e da 10 a 50 mln€.

Anche in questo caso è utile fare riferimento al report di ANCE sulla maturazione digitale dell'edilizia in Italia (Figura 2), dove viene messo in evidenza che “Il 43% delle imprese ritiene che il proprio personale sia “poco” pronto a utilizzare nuovi strumenti digitali” (ANCE, 2025). I dati ottenuti fanno emergere il possibile rischio di aumentare il divario tecnologico tra i grandi player del settore, già strutturati per l'innovazione, e le PMI che, però, come riporta l'Istat (Istituto Nazionale di Statistica) nel “Censimento permanente delle imprese 2023”, costituiscono la maggioranza del tessuto imprenditoriale italiano.

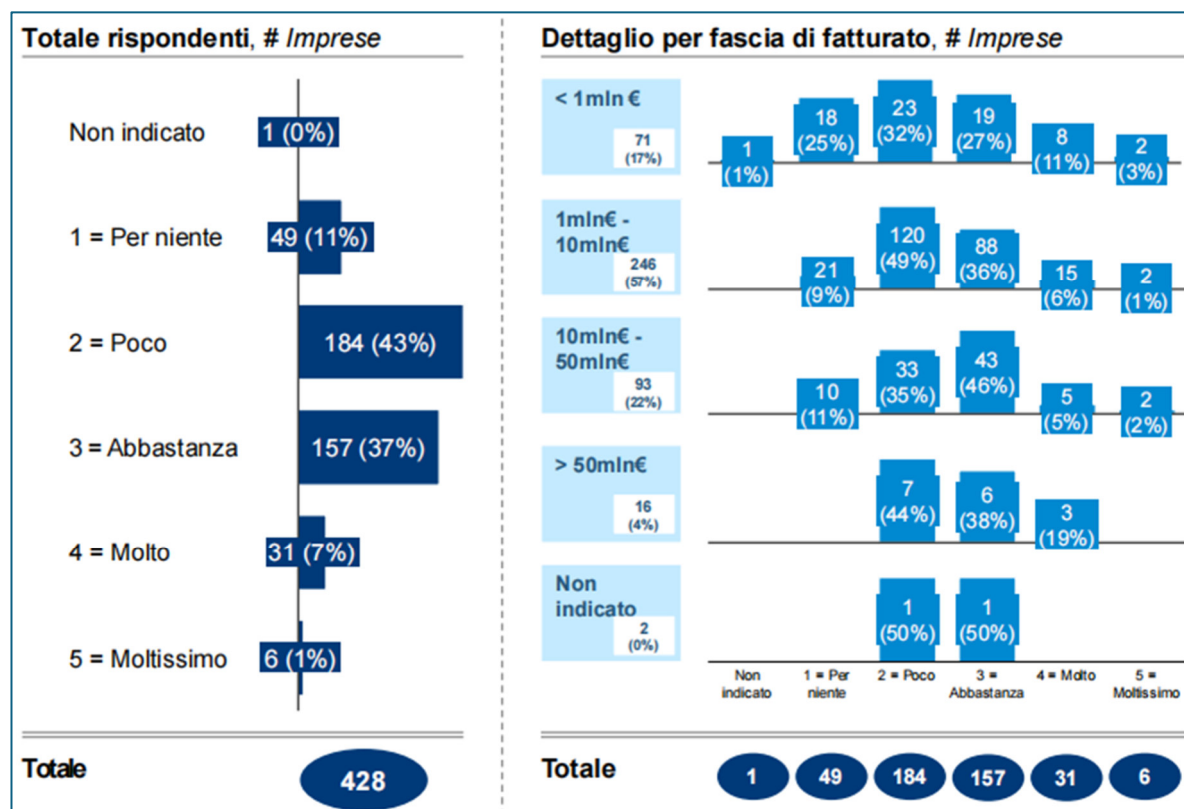


Figura 2 - Risultato del sondaggio sulla formazione del personale in ambito digitale – ANCE (2025)

L'interoperabilità è un altro aspetto critico che deve essere considerato quando si parla di BIM. L'assenza di standard nel settore porta alla mancanza di interoperabilità tra i diversi software e sistemi adottati.

Questo fa sì che per poter eseguire analisi sul modello BIM sia spesso necessario esportarlo in altri formati in modo da renderlo leggibile su altri software. Il processo di esportazione rende l'utilizzo del BIM una procedura complessa e che, se non effettuata correttamente, può facilmente comportare una perdita significativa di dati.

La perdita di dati, oltre che nel contesto dell'interoperabilità, può verificarsi anche nelle fasi di condivisione del modello tra i vari attori che intervengono nel processo edilizio durante il ciclo di vita dell'opera. La mancanza di standard e di codifiche da seguire comporta spesso numerose

incomprensioni e difficoltà nel ritrovare i dati necessari, comportando aumenti nei tempi e nel numero delle risorse impiegate.

Nei paragrafi successivi verranno analizzate nel dettaglio le diverse modalità di gestione dei dati nel BIM ed i possibili formati di esportazione, con l'obiettivo di individuare soluzioni atte a migliorare l'interoperabilità e la qualità informativa dei modelli.

1.1.1. Gestione informativa nei progetti BIM: il ruolo dei BIM DATA

Come anticipato nei paragrafi precedenti, il Building Information Modeling non si limita alla rappresentazione geometrica tridimensionale dell'opera, bensì si pone l'obiettivo di fare in modo che il modello diventi un archivio di informazioni rilevanti per il ciclo di vita del progetto. I dati contenuti all'interno di un modello BIM, noti come BIM Data, includono proprietà geometriche, fisiche, prestazionali, energetiche, economiche e manutentive, costituendo il patrimonio informativo essenziale per la collaborazione tra i diversi attori del processo edilizio.



Figura 3 - Contenuti del modello BIM

I BIM Data rivestono un ruolo fondamentale nella metodologia BIM perché rappresentano quegli elementi che consentono la condivisione efficiente di informazioni al di fuori del modello stesso e facilitano l'interoperabilità tra gli attori coinvolti, riducendo le ambiguità interpretative e migliorando la tracciabilità e la qualità del progetto. Affinché tali vantaggi si concretizzino, è necessario che i dati vengano correttamente definiti e strutturati, e che siano assegnati agli elementi del modello in maniera coerente e standardizzata.

Siccome un modello BIM può includere informazioni relative a tutte le varie fasi del processo edilizio ed alle discipline coinvolte durante la realizzazione del progetto – architettura, strutture, impianti, tempi, costi, prestazioni energetiche, sostenibilità, manutenzione – diventa cruciale una selezione accurata delle tipologie di dati da integrare in funzione degli obiettivi progettuali. Un modello con un eccesso di dati può infatti generare confusione e favorire la perdita di dati durante le fasi di esportazione e condivisione; al contrario, un modello con carenza informativa rischia di compromettere l'utilità stessa del modello.

Per affrontare tali criticità, sono stati sviluppati degli Standards specifici di riferimento in cui vengono definiti i livelli di dettaglio (LOD) richiesti in base al progetto, le tipologie di informazioni da includere nel modello, e le modalità di codifica da seguire per una corretta gestione dei BIM Data (Jensen F.W., 2022).

In particolare, a livello europeo la norma ISO² 23387:2020 stabilisce i criteri per la creazione di data templates: strutture di dati volte ad essere leggibili dalle macchine (machine readable), versatili, coerenti e compatibili con altri software. A livello nazionale, la norma UNI³ 11337 integra questi principi e fornisce ulteriori indicazioni operative adattate al contesto italiano. Delle tredici parti attualmente sono disponibili solo le prime sette, mentre quelle dalla 8 alla 13 sono ancora in fase di pubblicazione.

	Contenuti	
Parte 1	Modelli , elaborati e oggetti informativi per prodotti e processi	PUBBLICATO
Parte 2	Flussi informativi e processi decisionali (fasi della committenza)	
Parte 3	Modelli di raccolta, organizzazione, e archiviazione dell'informazione tecnica per i prodotti di costruzione	
Parte 4	Evoluzione e sviluppo informativo di modelli, elaborati e oggetti	
Parte 5	Flussi informativi nei processi digitalizzati	
Parte 6	Linea guida per la redazione del capitolato informativo	
Parte 7	Requisiti di conoscenza, abilità e competenza delle figure coinvolte nella gestione e nella modellazione informativa	
Parte 8	Classificazione	IN FASE DI PUBBLICAZIONE
Parte 9	Fase di esercizio e fascicolo del costruito	
Parte 10	Verifica digitale automatizzata delle pratiche amministrative e dei bandi di opere e servizi per l'edilizia, l'urbanistica e le infrastrutture nella pubblica amministrazione	
Parte 11	Sistema di gestione BIM – Requisiti (UNI/ Pdr 74)	
Parte 12	Linea guida per l'applicazione del BIM nella PA	
Parte 13	Flussi informativi, ruoli e requisiti per le opere infrastrutturali	

Figura 4 - Capitoli costituenti la norma UNI 11337

Attualmente si distinguono due approcci principali alla gestione dei dati:

- *BIM Data integrati* nel modello;
- *BIM Data collegati* al modello.

La prima soluzione prevede che i dati vengano direttamente attribuiti agli elementi del modello sotto forma di proprietà. Questa procedura si basa sull'adozione della struttura IFC, un formato

² L' ISO (International Organization for Standardization) è una federazione mondiale di organismi di normazione nazionali.

³ L'UNI (Ente Italiano di Normazione) si occupa di studiare, elaborare, pubblicare e diffondere gli standard.

aperto ed interoperabile che verrà trattato nel paragrafo successivo. Il vantaggio di utilizzare dei *BIM Data integrati* nel modello è quello di avere un accesso immediato e centralizzato ai dati. Allo stesso tempo, però, si rischia di portare ad un sovraccarico informativo che potrebbe compromettere la leggibilità e le prestazioni del modello.

La seconda soluzione prevede l'organizzazione dei dati all'interno di uno spazio di condivisione chiamato CDE (Common Data Environment) o ACDat (Ambiente di condivisione dati), ed il loro successivo collegamento agli oggetti del modello. Tale approccio consente una gestione più flessibile dei dati e riduce il rischio di sovraccarico informativo, garantendo, al tempo stesso, la tracciabilità e l'aggiornamento centralizzato delle informazioni.

Una corretta gestione dei *BIM Data* rappresenta, dunque, un presupposto fondamentale non solo per l'efficace implementazione del BIM, ma anche per lo sviluppo di soluzioni più avanzate come il Digital Twin (gemello digitale): una rappresentazione digitale ad alta fedeltà di un asset fisico in grado di monitorare, simulare, prevedere le prestazioni e controllare il sistema fisico attraverso un flusso bidirezionale di dati in informazioni per tutto il ciclo di vita dell'opera (Aritra P., 2023).

1.1.2. Interoperabilità e condivisione dei dati

Uno degli aspetti critici nell'adozione della metodologia BIM, come anticipato nei paragrafi precedenti, riguarda il tema dell'interoperabilità, ovvero la capacità di scambiare, interpretare e riutilizzare i dati tra i diversi attori e software coinvolti nel processo edilizio (Castagnone A.). L'assenza di standard unificati e la varietà di strumenti disponibili sul mercato rendono particolarmente complesso garantire una comunicazione fluida ed efficace.

Per agevolare lo scambio dei dati BIM è spesso necessario esportare i modelli in formati neutri e aperti, in grado di superare i vincoli imposti dai software proprietari. Nel paragrafo successivo saranno analizzati i principali formati di esportazione adottati nella pratica operativa.

1.1.2.1. I formati di esportazione per la condivisione dei dati

In origine (Eastman C., 2008), la condivisione di modelli digitali avveniva tramite formati di semplice rappresentazione geometrica, come il DXF (Drawing Exchange Format) o l'IGES (Initial Graphics Exchange Specification), i quali però non erano in grado di supportare dati informativi complessi.

A partire dalla fine degli anni '80, con la condivisione degli standard internazionali ISO, sono stati sviluppati nuovi formati di scambio in grado di supportare diversi tipi di informazioni. Questi formati si basavano sul linguaggio EXPRESS, definito dalla norma ISO 10303-11,

ovvero un linguaggio compatto in grado di gestire informazioni strutturate tramite l'architettura STEP (Standard for Exchange of Product model data).

I due approcci più utilizzati per l'interoperabilità nel contesto BIM sono l'OpenBIM ed il BIM Collaboration Hub. Il primo è il processo più adottato e si basa sullo scambio di informazioni attraverso formati aperti ed indipendenti dai software. Il secondo consiste in una piattaforma online sviluppata da buildingSmart International che mira a facilitare la collaborazione tra gli attori che intervengono nel processo edilizio.

Un formato viene definito aperto quando è libero da restrizioni di utilizzo e non subordinato ad alcun fornitore proprietario.

Il principale formato aperto di riferimento per il BIM è l'IFC (Industry Foundation Classes) standardizzato a livello internazionale attraverso la ISO 16739-1:2024.

Secondo la definizione di buildingSMART:

“IFC è una descrizione digitale standardizzata dell'ambiente costruito, inclusi edifici e infrastrutture civili. IFC è in grado di definire i componenti fisici di edifici, sistemi meccanici ed elettrici, nonché di modelli astratti per l'analisi strutturale, l'analisi energetica, la suddivisione dei costi, la programmazione dei lavori, ecc.”

Il formato IFC è caratterizzato da quattro fattori principali: l'identità degli oggetti, le relazioni che intercorrono tra di essi, la loro geometria e le informazioni associate.

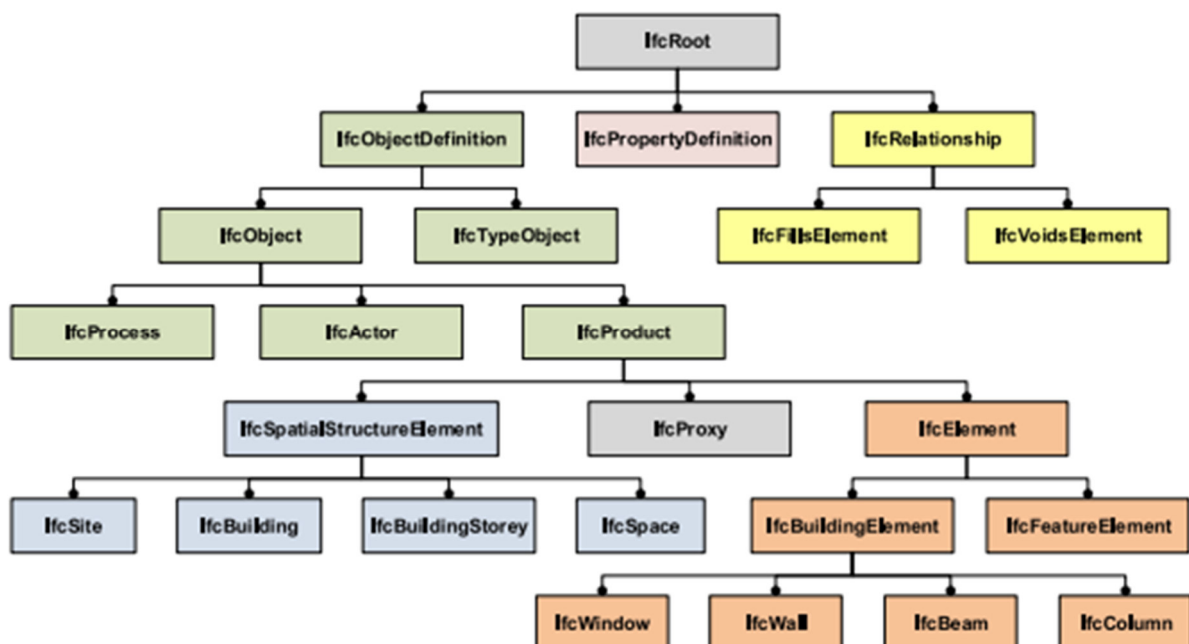


Figura 5 - Struttura dei dati nel formato IFC - A. Borrmann

La struttura IFC è una struttura molto complessa che non sempre risulta la più conveniente da adottare per l'esportazione di modelli. Modelli complessi e altamente dettagliati possono subire perdite informative durante l'esportazione, errori di interpretazione ed un conseguente aumento della complessità nella gestione.

Per questo motivo, oltre al formato IFC esistono anche altri formati aperti destinati a specifici ambiti come il BCF (BIM Collaboration Format), il gbXML (Green Building XML) ed il COBie (Construction-Operations Building information exchange).

A causa di questi problemi e difficoltà che si riscontrano nell'esportare i dati in altri formati, negli ultimi anni si è progressivamente affermata una nuova modalità di condivisione dei modelli BIM: il caricamento su piattaforme web-based.

1.1.3. Gestione e pubblicazione del modello BIM in ambiente digitale

Per poter impiegare al meglio la metodologia BIM occorre trovare una soluzione per condividere modelli e informazioni in modo semplice, veloce, accessibile da tutti i membri del team e che mantenga la struttura del dato. La soluzione a queste esigenze è rappresentata dall'utilizzo del cloud: *uno spazio virtuale accessibile via web mediante qualsiasi dispositivo a questo connesso, che consente di archiviare e sincronizzare i file rendendoli disponibili per la visualizzazione e l'elaborazione ai componenti del team di progettazione.*

In particolare, lo spazio digitale dedicato alla gestione dei modelli BIM prende il nome di Common Data Environment (CDE) o Ambiente di condivisione dati (ACDat) nella normativa italiana UNI 11337 la quale riporta che l'ambiente deve garantire i requisiti di interoperabilità dei dati, sicurezza degli accessi e delle comunicazioni e tracciabilità delle modifiche. L'adozione del CDE consente di superare i tradizionali vincoli legati alla localizzazione fisica dei file, permettendo ai diversi membri del team di collaborare in tempo reale senza la necessità di installare o aggiornare localmente i diversi software.

Un'ulteriore evoluzione interessante del CDE è rappresentata dagli OpenCDE, che si basano sull'utilizzo di tecnologie web-service-based per collegare direttamente le applicazioni software ai CDE attraverso API standardizzate. In questo modo si elimina la necessità di interventi manuali e si garantisce un flusso dati più rapido, sicuro e strutturato.

A livello teorico il web potrebbe essere utilizzato come mezzo di condivisione dati anche senza passare necessariamente attraverso la creazione di un apposito CDE. In questo modo si avrebbe la possibilità di raggiungere un target più ampio, di avere un notevole abbattimento dei costi e di avere un accesso immediato dal browser. Allo stesso tempo, però, tale soluzione presenta dei limiti significativi per quanto riguarda il controllo, la sicurezza e la standardizzazione dei dati.

Un esempio di piattaforma web che consente la visualizzazione e la condivisione del modello BIM è Autodesk Forge. Questa contiene una serie di API (Application Program Interface) e di SDK (Software Development Kit) per sviluppare applicazioni personalizzate che gestiscano modelli BIM nel cloud, supportando flussi informativi dinamici e collaborativi.

L'utilizzo di soluzioni cloud per la gestione dei modelli BIM si configura pertanto come un passaggio imprescindibile per realizzare un'effettiva digitalizzazione dei processi edilizi, aprendo la strada verso scenari di collaborazione integrata, automazione e trasparenza operativa.

1.2. Strumenti e metodologie innovative per la gestione del cantiere: soluzioni attive a passive

Le metodologie adottate per la gestione del cantiere si stanno evolvendo di anno in anno. Nonostante le grandi potenzialità, infatti, il BIM da solo non è sufficiente ad automatizzare la gestione dei progetti edili perché necessita di un continuo intervento manuale. La combinazione del BIM con le nuove tecnologie che si stanno interfacciando con il settore dell'edilizia può offrire numerosi vantaggi e opportunità. In particolare, il mondo della ricerca si sta focalizzando su due differenti tipi di approcci: un approccio attivo ed un approccio passivo. Il primo vede come attori principali il BIM e l'intelligenza artificiale e ha come obiettivo quello di trovare delle soluzioni e dare automaticamente delle risposte tramite l'AI. Il tema principale in questo caso è quello della ricerca di una metodologia che consenta di interagire direttamente con il modello e di interrogarlo attraverso indicazioni testuali. Il secondo mira all'ottimizzazione ed all'automazione dei processi senza fornire delle vere e proprie risposte ma riducendo le azioni manuali. Ne sono un esempio il metodo della blockchain ed il BIM-to-field.

In entrambi i casi il fattore a cui bisogna prestare più attenzione in quanto è spesso fonte di problemi, è la qualità del dato: un aspetto fondamentale per ottenere dei modelli e delle analisi affidabili.

1.2.1. L'AI per la gestione del cantiere

La gestione del cantiere è una tematica complessa che vede interagire tra di loro numerose attività e soggetti da organizzare e coordinare. L'intelligenza artificiale rappresenta il mezzo che, se adeguatamente sfruttato, potrebbe ottimizzare questo processo. In particolare, si può scegliere di adottare due diverse tipologie di intelligenza artificiale in base agli obiettivi: un'AI predittiva ed una generativa. La prima, anche conosciuta come AI con apprendimento supervisionato (supervised learning), si basa sull'analisi di dati storici per fare delle previsioni

mirate e risolvere problemi specifici, contribuendo così nella previsione dei rischi di progetto e nell'ottimizzazione di costi e tempi. La seconda, anche nota come AI con apprendimento non supervisionato (unsupervised learning), è una soluzione più innovativa e, a differenza della prima, è in grado di elaborare e fornire nuovi contenuti, andando a generare nuovi modelli parametrici, report e simulazioni di scenari in cantiere e identificando pattern e relazioni autonomamente.

L'immagine seguente mostra l'impatto che la GenAI (AI generativa) avrebbe sui vari settori, tra cui quello delle costruzioni.



Figura 6 – Rapporto McKinsey 2023 sull'impatto della GenAI nelle imprese

Come si può vedere, il contributo maggiore da parte dell'intelligenza artificiale si avrebbe nel settore della vendita e della condivisione del prodotto, e nello sviluppo del prodotto in sé.

L'adozione dell'Intelligenza artificiale nel settore edile e la potenzialità che potrebbe rappresentare sono stati un altro tema affrontato da ANCE nel sondaggio riportato nel report *“Analisi del livello di maturità tecnologica/digitale degli Associati ANCE”*. In particolare, i risultati hanno evidenziato che circa il 36% delle imprese ritengono che l'AI potrà contribuire “abbastanza” ad una crescita futura dell'azienda (ANCE, 2025).

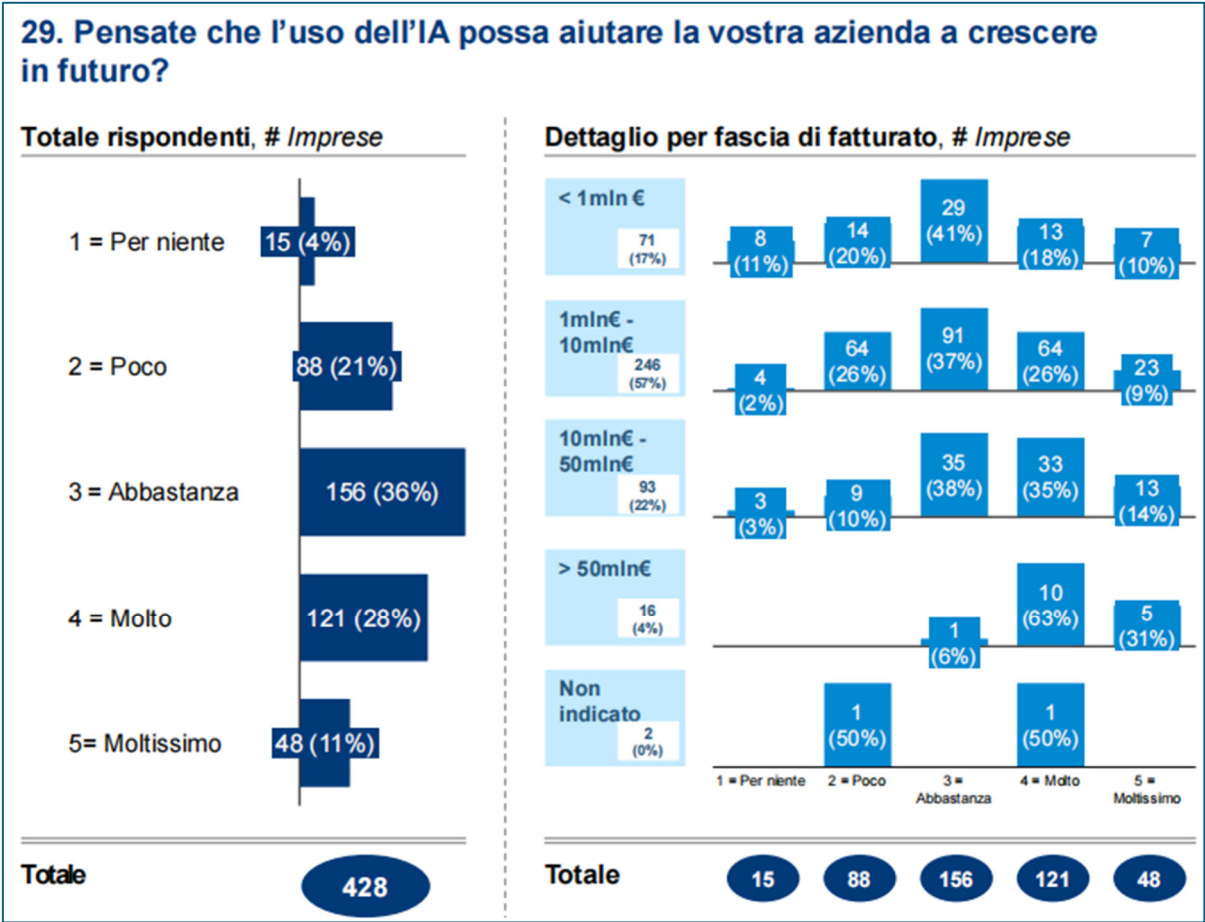


Figura 7 – risultato del sondaggio sul contributo futuro dell'AI nelle imprese – ANCE (2025)

Nonostante ciò, un altro punto del report restituisce che il 43% delle imprese non ha ancora previsto investimenti in tecnologie digitali e AI per i prossimi 2-3 anni e che, al contrario, solamente il 2% è intenzionata ad intraprendere un percorso di digitalizzazione e automazione in tempi brevi.

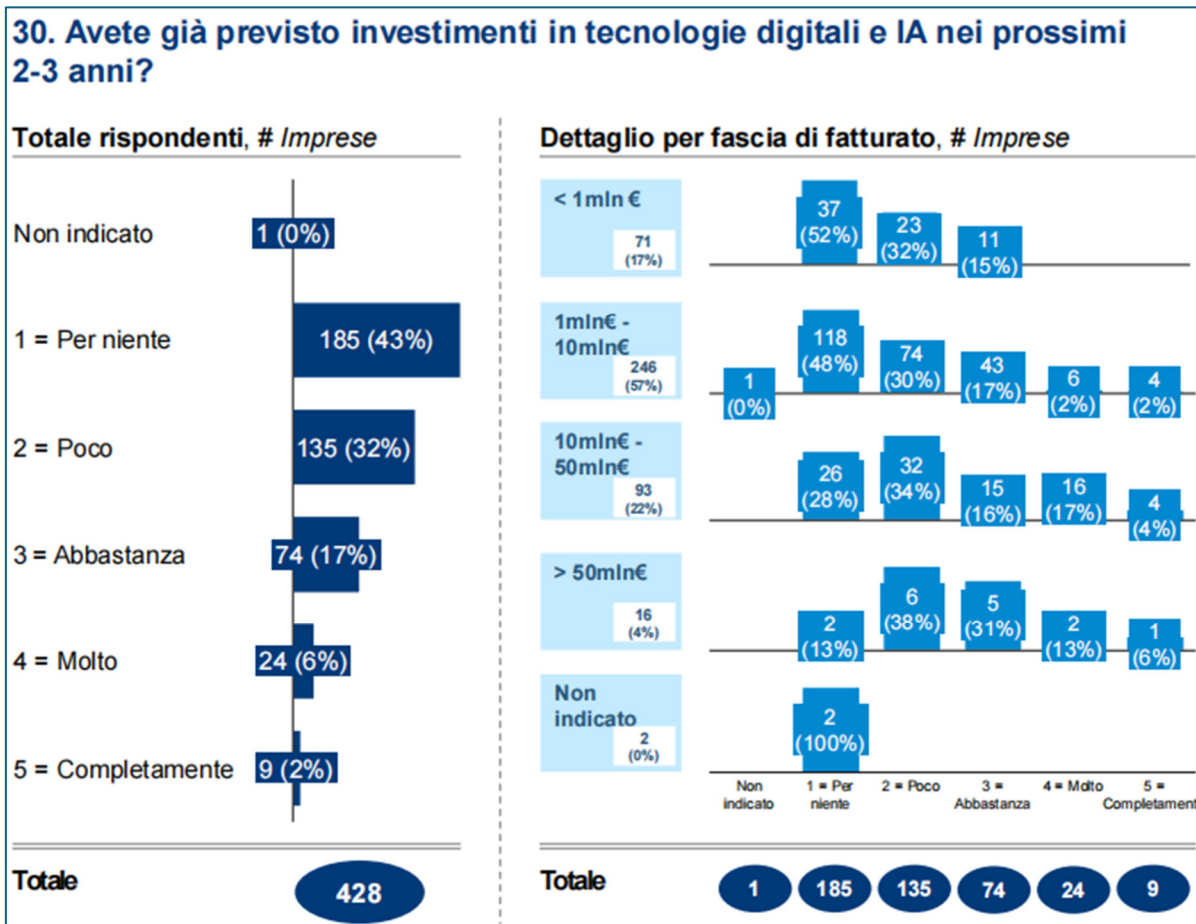


Figura 8 – risultato del sondaggio sugli investimenti previsti da parte delle imprese nell'AI – ANCE (2025)

Questi risultati evidenziano uno dei principali problemi del settore delle costruzioni, soprattutto in Italia, ovvero il fatto di avere consapevolezza delle potenzialità delle tecnologie innovative, ma avere allo stesso tempo pochi strumenti a disposizione e poche risorse da investire nel campo della ricerca. Nei paragrafi che seguono verranno mostrati alcuni degli studi più significativi per quanto riguarda le potenzialità dell'adozione dell'AI nell'edilizia.

1.2.1.1. Interazione con i modelli BIM mediante agenti conversazionali

Come già accennato nei paragrafi precedenti, uno degli obiettivi principali del mondo della ricerca è quello di sviluppare una metodologia che permetta di interagire in maniera diretta con il modello BIM. Negli ultimi anni sono state individuate diverse procedure finalizzate al raggiungimento di tale scopo.

Il Conversational BIM (Sururah A., 2020) rappresenta una metodologia innovativa che consiste nel creare un'interfaccia conversazionale tra il modello BIM ed il lavoratore, facendo in modo che quest'ultimo venga supportato nel reperire informazioni e nell'implementare le fasi di progettazione. La procedura prevede che l'operatore possa richiedere informazioni tramite

input vocali e ricevere risposte, andando così ad ottimizzare i tempi e migliorando la produttività.

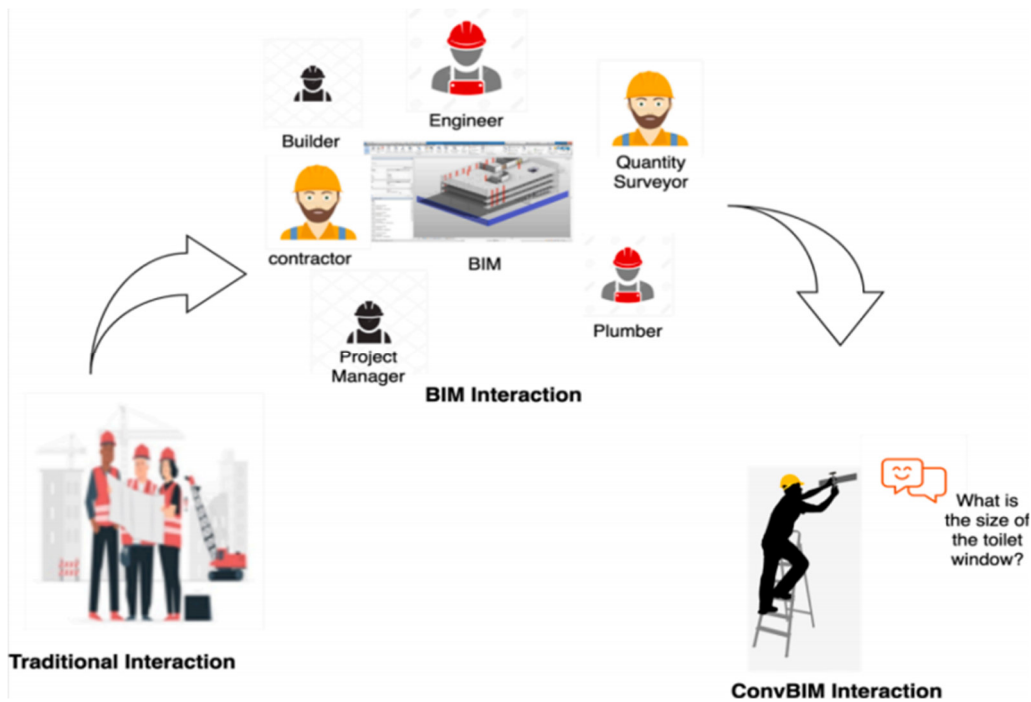


Figura 9 – Evoluzione delle interazioni con il modello BIM attraverso il Conversational BIM (Sururah A., 2020)

Il sistema si basa su una piattaforma cloud (Amazon Web Services – AWS) e integra tecnologie di Cloud Computing, Conversational AI, Natural Language Processing (NLP) e Deep Learning (DL). Il processo inizia con l’acquisizione di un input vocale, che viene convertito in testo tramite modelli di speech recognition neurale (Amazon Transcribe), e analizzato tramite DL. La richiesta viene elaborata ed interpretata tramite processi NLP che, usando API Forge o formati IFC, interrogano il modello BIM precedentemente caricato nel cloud per estrarre le informazioni desiderate. La risposta viene poi generata e sintetizzata tramite modelli neurali text-to-speech (Amazon Polly).

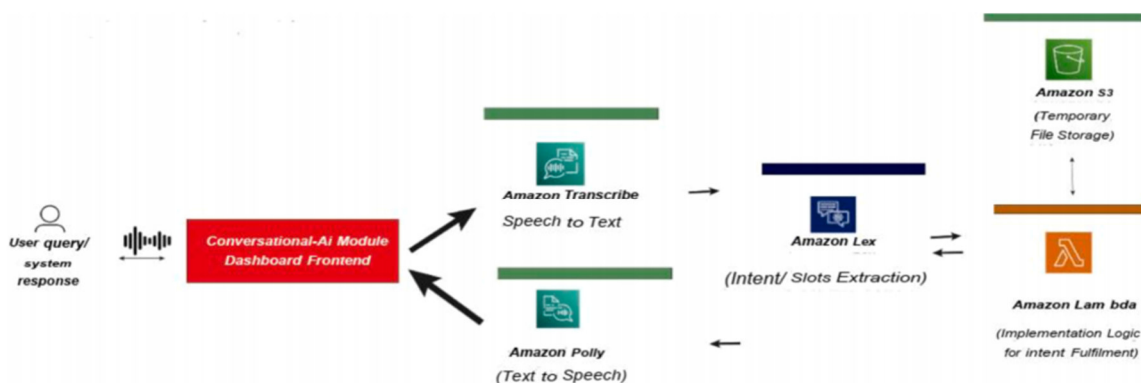


Figura 10 – Schema rappresentativo del funzionamento del Conversational BIM (Sururah A., 2020)

Il sistema presenta numerosi punti di forza come l'accessibilità vocale hands-free, la scalabilità cloud-native e la capacità di ottimizzare i tempi operativi. Allo stesso tempo, però, presenta diversi limiti quali: la rigidità dei task supportati, la dipendenza da una buona connessione cloud, una gestione vocale sensibile al rumore, ed il rischio che si verifichino ambiguità linguistiche.

Una metodologia analoga è quella descritta da Zheng e Fisher (2023) nel framework BIM-GPT. In questo caso non si usa l'approccio tradizionale basato su NLP, ma un Prompt Manager in grado di costruire un prompt dinamico su misura in funzione della query posta dall'utente. Il prompt viene generato dalla combinazione della query e dallo schema strutturale del modello BIM, e viene poi mandato tramite API OpenAI a ChatGPT che interpreta la richiesta ed elabora una risposta coerente con il linguaggio naturale. L'interazione con il modello BIM avviene tramite Autodesk Forge, un visualizzatore di modelli BIM, ed un database strutturato MongoDB che contiene i dati del modello esportati sotto forma di IFC.

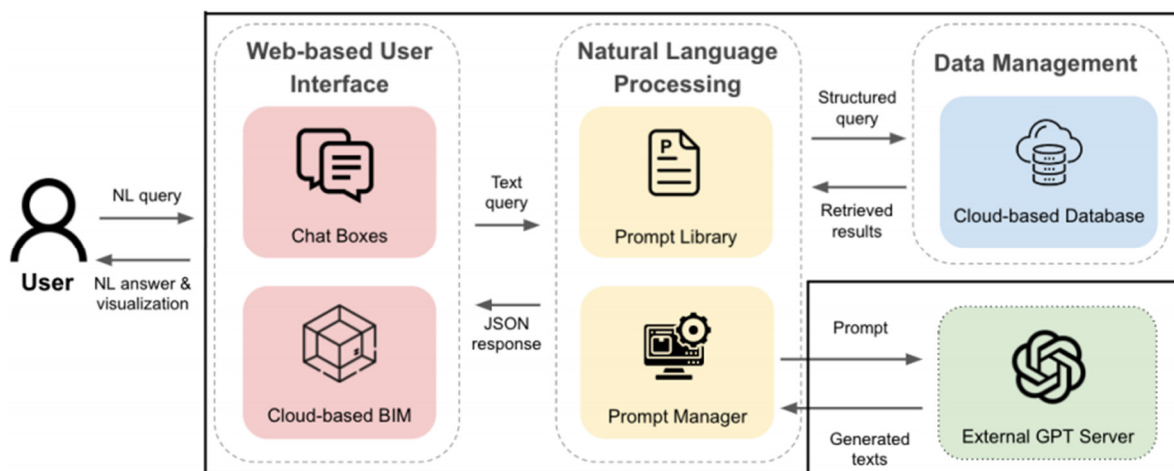


Figura 11 – Schema rappresentativo del funzionamento del framework BIM-GPT (Zheng, 2023)

Questo sistema consente l'elaborazione di domande più complesse rispetto al Conversational BIM precedentemente descritto, però è fortemente dipendente dalla qualità e dalla struttura dei dati BIM.

Un'ulteriore piattaforma che ha come obiettivo quello di semplificare la comunicazione con il modello BIM è DAVE (Digital Assistant for Virtual Engineering). La metodologia si articola in più fasi (Fernandes, Garg, Nikkel, & Guven, 2024): inizialmente si estraggono i dati dal file .rvt di Revit attraverso le API di Autodesk Platform Services e si convertono prima in formato json (file tree.json e properties.json) e poi in CSV in modo da garantire la compatibilità con modelli linguistici generativi come GPT-4 Turbo. Utilizzando le API OpenAI (GPT-4 Turbo) si genera un assistente intelligente configurato tramite funzioni Json (function calling) che

permettono di associare a specifiche richieste dell'utente azioni concrete da eseguire sul modello BIM. Come interfaccia con l'utente viene utilizzato il linguaggio Python GUI che consente all'utente di comunicare sia tramite input testuale, sia mediante comandi vocali grazie all'integrazione di Whisper-1 (ASR) che converte la voce in testo. Quest'ultimo arriva quindi a GPT-4 Turbo che analizza la richiesta, rileva i parametri del modello BIM coinvolti e genera una funzione in formato Json. Questa viene scritta in un file di interscambio bridge.json che viene monitorato da un file Watcher C# su Revit che esegue l'azione sul modello e aggiorna a sua volta il bridge.json con l'esito dell'operazione (successo/errore). Questa arriva, infine, alla piattaforma GUI e viene comunicata all'utente.

A differenza delle due metodologie precedenti il processo DAVE è in grado di collegare direttamente l'intelligenza artificiale alla manipolazione del modello BIM. Il limite principale, però, è che viene richiesta una configurazione tecnica complessa e, per essere efficace, dipende anche in questo caso da una corretta pre-elaborazione dei dati BIM.

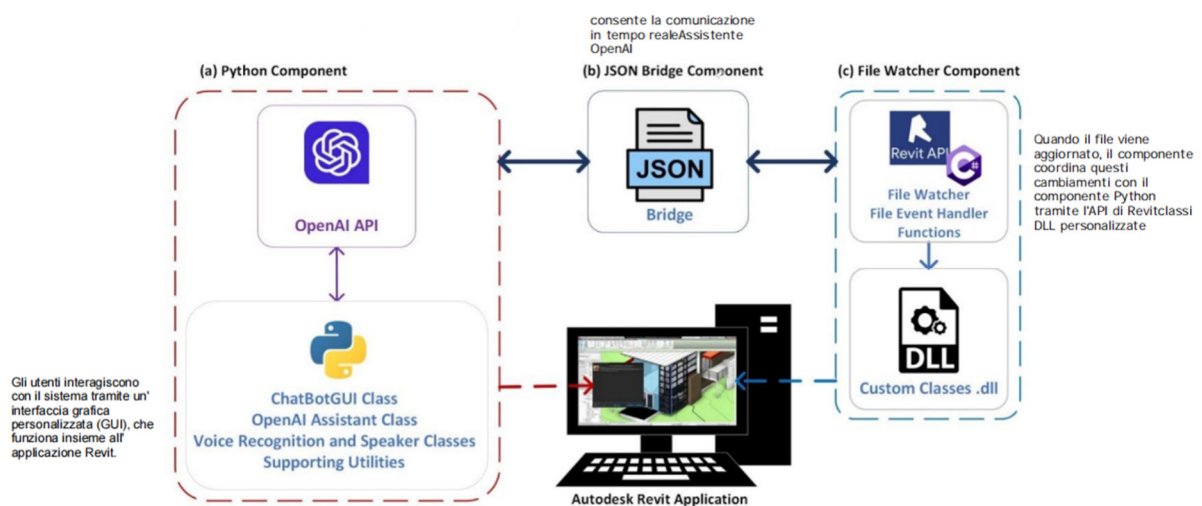


Figura 12 – Schema rappresentativo del funzionamento della metodologia DAVE (Fernandes, Garg, Nikkel, & Guven, 2024)

Le tre metodologie descritte mostrano come sta evolvendo il settore edile nell'implementazione dell'intelligenza artificiale. Il Conversational BIM (AWS) costituisce una soluzione ideale per richieste rapide e poco complesse; il BIM-GPT di Stanford permette di recuperare informazioni più complesse ma con analisi lente e risposte dirette. La piattaforma DAVE costituisce ancora un avanzamento rispetto alle altre due soluzioni proposte perché permette di interfacciarsi con l'intelligenza artificiale andandola ad interrogare e offrendo la possibilità di eseguire azioni dirette sul modello. Il problema principale consiste nell'estrazione di un formato json dal modello BIM che può portare facilmente ad una perdita di informazioni nei modelli più

complessi, e nel fatto che la procedura e l'interfaccia Python con l'utente siano ancora di difficile intuizione per utenti non esperti.

1.2.2. La blockchain e la digitalizzazione dei processi costruttivi

Un'ulteriore metodologia emergente che potrebbe offrire significativi vantaggi nell'ottimizzazione dei tempi, dei costi e dei processi decisionali nel settore delle costruzioni si basa sull'utilizzo della tecnologia blockchain. Questa consiste nella realizzazione di un registro digitale decentralizzato e immutabile che consente di tracciare e certificare in modo trasparente tutte le attività rilevanti lungo il ciclo di vita dell'opera. Per fare ciò, opera su una serie di nodi o computer, ognuno dei quali mantiene una copia dell'informazione al suo interno. In questo modo nessuna entità ha il controllo completo sui dati ed ogni "blocco" costituente un'informazione viene collegato al precedente creando una catena continuamente aggiornata. La blockchain può risultare particolarmente vantaggiosa se applicata al monitoraggio, alla tracciabilità ed alla gestione automatica dei materiali e delle attività di cantiere (Elsharkawi H., 2025). Per automatizzare le procedure, inoltre, la blockchain può essere combinata con lo Scan-to-BIM, ovvero un processo di creazione di un modello BIM di un edificio esistente partendo da un rilievo digitale 3D. I dati acquisiti in tempo reale da rilievi LIDAR e fotogrammetrici vengono, quindi, elaborati per aggiornare il modello BIM. Questi vengono successivamente inviati alla blockchain attraverso dei chain-link⁴, che fungono da ponte tra il mondo fisico e quello digitale. Quando i report dei lavori completati vengono caricati sulla blockchain e viene verificato che siano state soddisfatte le condizioni contrattuali, la blockchain attiva gli smart-contracts e automatizza l'esecuzione dei pagamenti o l'aggiornamento dei registri di avanzamento.

L'immagine che segue rappresenta il flusso di lavoro descritto nelle righe precedenti che unisce il BIM con la blockchain, dividendolo nelle sue tre fasi principali, ovvero:

- Lo Scan-to-BIM con il rilievo 3D del cantiere reale e la conseguente realizzazione del modello BIM;
- Il System Building in cui i dati BIM vengono collegati ad una rete blockchain e si creano gli Smart Contract;
- Il System implementation in cui I diversi attori del processo interagiscono tramite la blockchain.

⁴ Il chain-link è una rete oracle decentralizzata che permette ai contratti intelligenti di su blockchain di connettersi a risorse esterne come feed di dati, API e pagamenti bancari.

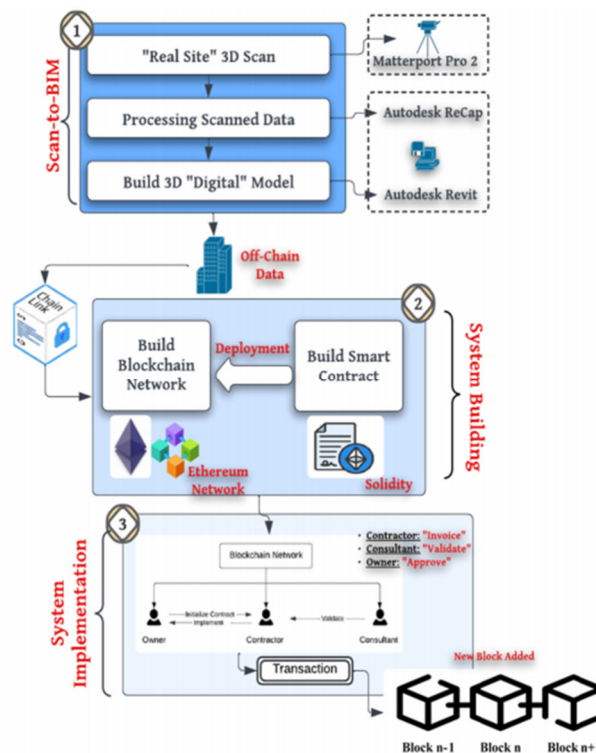


Figura 13 – Schema rappresentativo della metodologia basata sulla blockchain, (Elsharkawi H., 2025)

In linea con questo approccio, numerosi altri studi sull'utilizzo della blockchain per la gestione sostenibile dei rifiuti da costruzione dimostrano come tale tecnologia possa migliorare radicalmente la trasparenza, l'efficienza e l'accountability. In particolare, la blockchain consente di tracciare ogni fase della gestione dei rifiuti attraverso la registrazione in tempo reale da parte di tutti gli stakeholder (Faiz F., 2024). L'introduzione di smart contracts in questo ambito consentirebbe, inoltre, di automatizzare il rispetto delle normative ambientali e la rendicontazione dei flussi dei materiali, favorendo l'adozione di strategie di economia circolare, la riduzione di materiali mandati alle discariche e l'incentivo al riciclo.

Nonostante i vantaggi precedentemente evidenziati, vi sono anche criticità da considerare come la complessità tecnica dei sistemi blockchain, la definizione degli standard condivisi tra gli stakeholder, la gestione della privacy e, soprattutto, i problemi legati all'interoperabilità con i software esistenti.

1.2.3. Tecnologia BIM-to-field: interazione diretta tra modello e realtà

Il termine BIM-to-field identifica una metodologia innovativa che mira a trasferire in modo diretto e operativo i dati digitali contenuti in un modello BIM al cantiere fisico, con l'obiettivo di ottimizzare l'esecuzione dei lavori e garantire la conformità tra quanto progettato e quanto effettivamente realizzato. Questo processo può risultare particolarmente efficace se integrato con tecnologie di Realtà virtuale (VR) e Realtà Aumentata (AR) perché permetterebbe di

monitorare lo stato di avanzamento lavori in tempo reale e di verificare che sia conforme con quanto progettato nel modello BIM (Zollmann S., 2014).

La procedura operativa da seguire è costituita da tre componenti fondamentali: l'Aerial Client che cattura le immagini tridimensionali da confrontare con il modello; il Reconstruction Client che si occupa di elaborare i dati raccolti; l'AR Client che implementa un sistema di visualizzazione direttamente in sito. La prima fase eseguita dall'Aerial Client si basa sull'utilizzo di droni di piccole dimensioni (MAV-micro aerial vehicles) e segue l'approccio dello Scan-to-BIM in quanto mira a generare un modello tridimensionale dello stato di fatto. La ricostruzione delle immagini eseguite nella fase aerea viene condotta dal Reconstruction Client che, tramite tecniche di Structure-from-motion (SfM) è in grado di ricostruire una nuvola di punti tridimensionale che rappresenta fedelmente l'opera in corso di costruzione. Tale modello può essere condiviso e confrontato con il modello BIM as-planned per verificarne le discrepanze. Infine, l'AR Client, tramite l'adozione di tecniche di Realtà Aumentata, implementa un sistema di visualizzazione aumentata in sito, consentendo agli operatori di sovrapporre il modello digitale al contesto reale e di osservare in tempo reale le aree completate, quelle mancanti e le eventuali non conformità, grazie anche all'adozione di codifiche cromatiche che facilitano la comprensione delle informazioni.

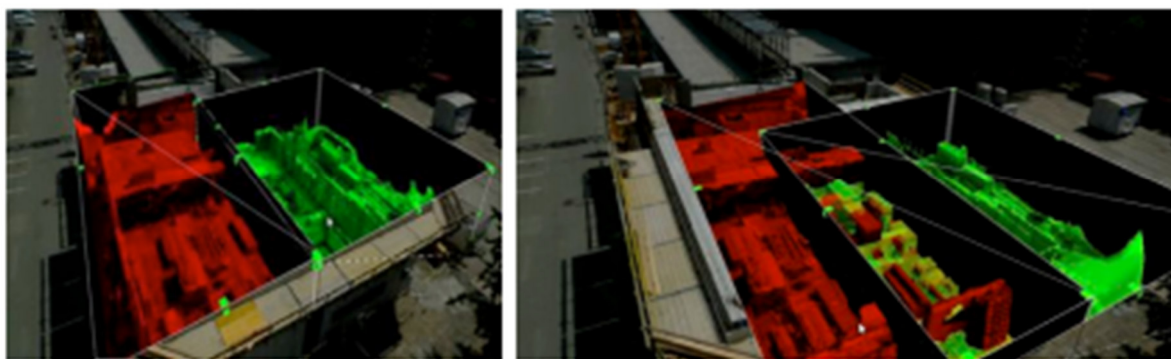


Figura 14 - Esempio di utilizzo del BIM-to-field e dell'adozione delle codifiche cromatiche (Zollmann S., 2014)

La metodologia del BIM-to-field permette, quindi, non solo di calcolare in modo automatico le percentuali di completamento, ma anche di identificare variazioni rispetto al cronoprogramma e supportare decisioni in tempo reale. Anche in questo caso bisogna prestare particolare attenzione all'affidabilità dei dati in quanto la presenza di errori nel modello potrebbe compromettere significativamente le analisi eseguite. L'implementazione del BIM-to-field, inoltre, comporta investimenti iniziali notevoli in software, hardware e formazione del personale che potrebbero risultare proibitivi per alcune aziende e soprattutto per le PMI come evidenziato nei paragrafi precedenti.

Al termine dell'analisi delle tre metodologie emergenti considerate – Intelligenza artificiale, Blockchain e Bim-to-field – risulta, quindi, opportuno proporre una sintesi comparativa che ne metta in evidenza i punti di forza in relazione ad alcuni parametri considerati fondamentali per la gestione del cantiere. La tabella che segue mette a confronto le tre soluzioni rispetto a cinque criteri ritenuti significativi quali: comprensibilità da parte dell'utente, semplicità di implementazione, multidisciplinarietà, quantificazione dei risultati ottenibili e grado di attualità.

Tabella 1 – Confronto tra AI, Blockchain e Bim-to-field

	Comprensibilità da parte dell'utente	Semplicità di implementazione	Multidisciplinarietà	Quantificazione dei risultati	Grado di attualità
Intelligenza Artificiale	+++	++	+++	++	+++
Blockchain	+	+	+	+	++
Bim-to-field	++	+	+	+	+

+++ = *molto elevato*

++ = *media*

+ = *bassa*

La comparazione permette di individuare in maniera immediata le potenzialità applicative ed i possibili limiti delle tre tecnologie. L'analisi non si limita, quindi, a confrontare le tre metodologie ma costituisce il presupposto per orientare l'individuazione della domanda di ricerca verso l'ambito che risulta più promettente in termini di applicabilità e potenziale di innovazione. L'attenzione verrà, di conseguenza, posta sull'Intelligenza Artificiale in quanto è la soluzione che permette nel miglior modo di integrare il BIM ed i requisiti di sostenibilità offrendo al tempo stesso un contributo concreto nella risoluzione delle criticità che caratterizzano i processi di gestione del cantiere.

Alla luce di queste considerazioni, il capitolo successivo si concentra sull'individuazione della domanda di ricerca, approfondendo i principali temi di ricerca attuali.

1.3. Individuazione della domanda di ricerca

L'ambito e lo scopo della tesi sono stati definiti previa individuazione della domanda di ricerca. Questa permette di inquadrare quali sono i temi su cui si focalizza il mondo della ricerca al momento dell'indagine, quali sono gli obiettivi che ci si propone di raggiungere e quali gap di conoscenza si potrebbero colmare. Per identificarla è stata effettuata una mappatura bibliometrica, ovvero una rappresentazione visiva che, attraverso la realizzazione di diagrammi, permette di individuare quali sono i temi attualmente più affrontati nelle pubblicazioni scientifiche. Come fonte per reperire il materiale accademico è stata utilizzata la piattaforma Scopus, la quale permette di effettuare delle ricerche per parole chiave e di estrapolare i risultati in formato .csv. Sono, quindi, state eseguite tre diverse ricerche inserendo i seguenti vocaboli:

- (*"building information modeling" OR "BIM"*) AND (*"construction management" OR "site management" OR "construction site"*) AND (*"artificial intelligence" OR "machine learning" OR "deep learning"*);
- (*"building information modeling" OR "BIM"*) AND (*"construction management" OR "site management" OR "construction site"*) AND (*"blockchain" OR "distributed ledger"*);
- (*"building information modeling" OR "BIM"*) AND (*"construction management" OR "site management" OR "construction site"*) AND (*"BIM to field" OR "field robotics" OR "site automation" OR "robotic construction" OR "construction site automation"*).

Dei risultati ottenuti sono stati esportati in formato .csv solamente quelli pubblicati nell'anno 2025 e sono stati successivamente importati all'interno di VOSViewer, un software che, una volta forniti i dati di input, permette di realizzare automaticamente una mappatura bibliometrica. L'analisi è stata realizzata creando un filtro per key-words e per anno di pubblicazione. Siccome il file importato conteneva key-words diverse ma con significato analogo, è stato necessario redigere un *VOSViewer thesaurus file* ovvero un documento in formato .txt con all'interno delle regole scritte in forma di stringhe che convertissero le diverse espressioni con significato analogo in un unico termine. In particolare, è stato realizzato il seguente testo:

Label;Replace by

bim;Building Information Modeling

B.I.M.;Building Information Modeling

building information modelling;Building Information Modeling

bim level 3;Building Information Modeling
AR;Augmented Reality
Aug. Reality;Augmented Reality
blockchain-based;Blockchain
smart contracts;Smart contract
artificial intelligence;ai
artificial intelligence (ai);ai
artificial intelligence use on;ai
bim in construction;Building Information Modeling
bim modelling;Building Information Modeling
bim 4d;Building Information Modeling
building information modeling (bim); building information modeling
building information modelling (bim); building information modeling
artificial intelligence use on construction site;ai
bim learning model;building information modeling
bim use on construction sites;building information modeling
block-chain;Blockchain
building information model;building information modeling
systematic literature review;systematic review
machine learning;machine-learning
construction sectors;construction industry
sustainable building;sustainability
sustainable evelopment;sustainability
sustainable construction;sustainability

Nella preliminare definizione degli input sono state selezionate le seguenti opzioni:

- Type of analysis > Co-occurrence;
- Unit of analysis > All keywords;
- Counting method > Full counting;
- Minimum of number of occurrences of a keyword: 10;
- Number of keywords to be selected: 100

Una volta impostati i parametri preliminari è stata effettuata l'analisi che ha riportato la seguente mappatura bibliometrica.

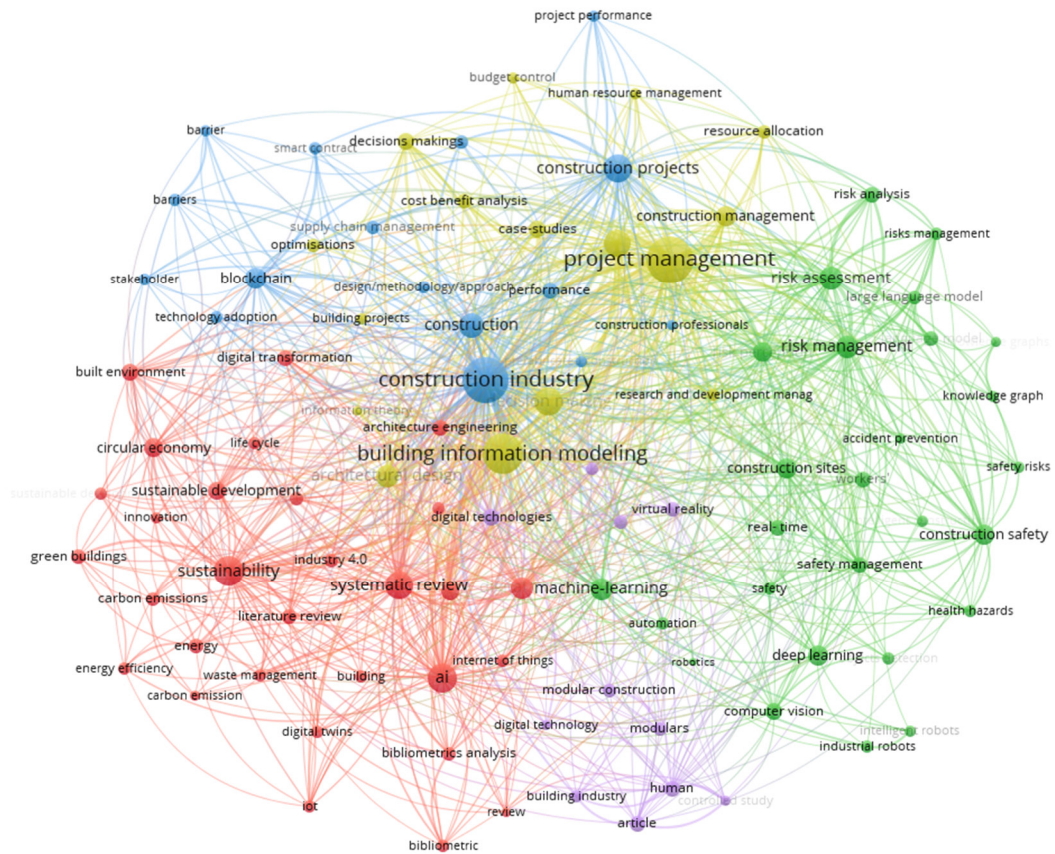


Figura 15 - Mappatura bibliometrica, Network Visualization, realizzata con VOSViewer

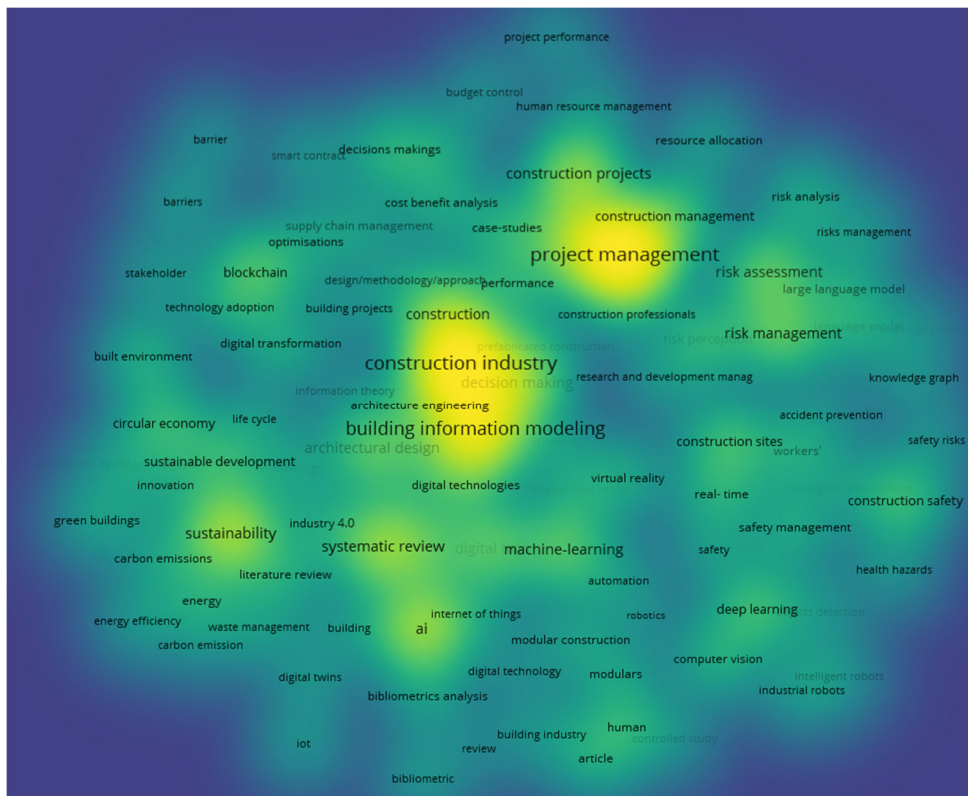


Figura 16 – Mappatura bibliometrica, Density Visualization, realizzata con VOSViewer

Come si evince dalle immagini soprastanti ed in particolare dalla Density Visualization, i temi attualmente più affrontati nel settore dell'edilizia, e su cui si sta concentrando il mondo della ricerca sono il BIM (Building Information Modeling), l'AI (Artificial Intelligence) e la sostenibilità. Viene di seguito riportata la tabella con le 20 parole chiave più utilizzate nel 2025 che conferma quanto già evidenziato dai grafici precedenti.

Tabella 2 – Riepilogo della frequenza delle Keywords

	Keyword	Occurences
1	Project Management	444
2	Construction industry	425
3	BIM	329
4	sustainability	188
5	AI	174
6	Systematic review	157
7	Construction project	155
8	Decision making	154
9	Information Management	149
10	Construction	123
11	Risk assessment	110
12	Risk management	107
13	architectural design	105
14	machine learning	101
15	digital twin	100
16	blockchain	95
17	construction management	86
18	Construction safety	82
19	circular economy	72
20	Construction sites	81

L'analisi delle keywords evidenzia chiaramente la centralità del tema dell'intelligenza artificiale rispetto all'adozione delle altre soluzioni tecnologiche. In particolare, la blockchain compare con una frequenza pari a circa la metà dell'AI, ed il Bim-to-field non figura nemmeno tra le prime venti parole chiave più ricorrenti. Tale distribuzione conferma come l'intelligenza artificiale rappresenti attualmente l'ambito di ricerca e applicazione maggiormente considerato all'interno del settore delle costruzioni. Ciò è dovuto probabilmente alla sua immediatezza di utilizzo una volta progettata ed alla sua intrinseca natura multidisciplinare, che ne consente l'adozione in diversi ambiti del processo edilizio.

Per rendere più chiara la collocazione del presente lavoro di tesi e mostrare visivamente le relazioni tra i diversi ambiti coinvolti viene di seguito riportato uno schema in cui viene sintetizzata l'interazione tra BIM, AI e Sostenibilità, evidenziandone i punti di contatto ed i gap che si intende contribuire a colmare.

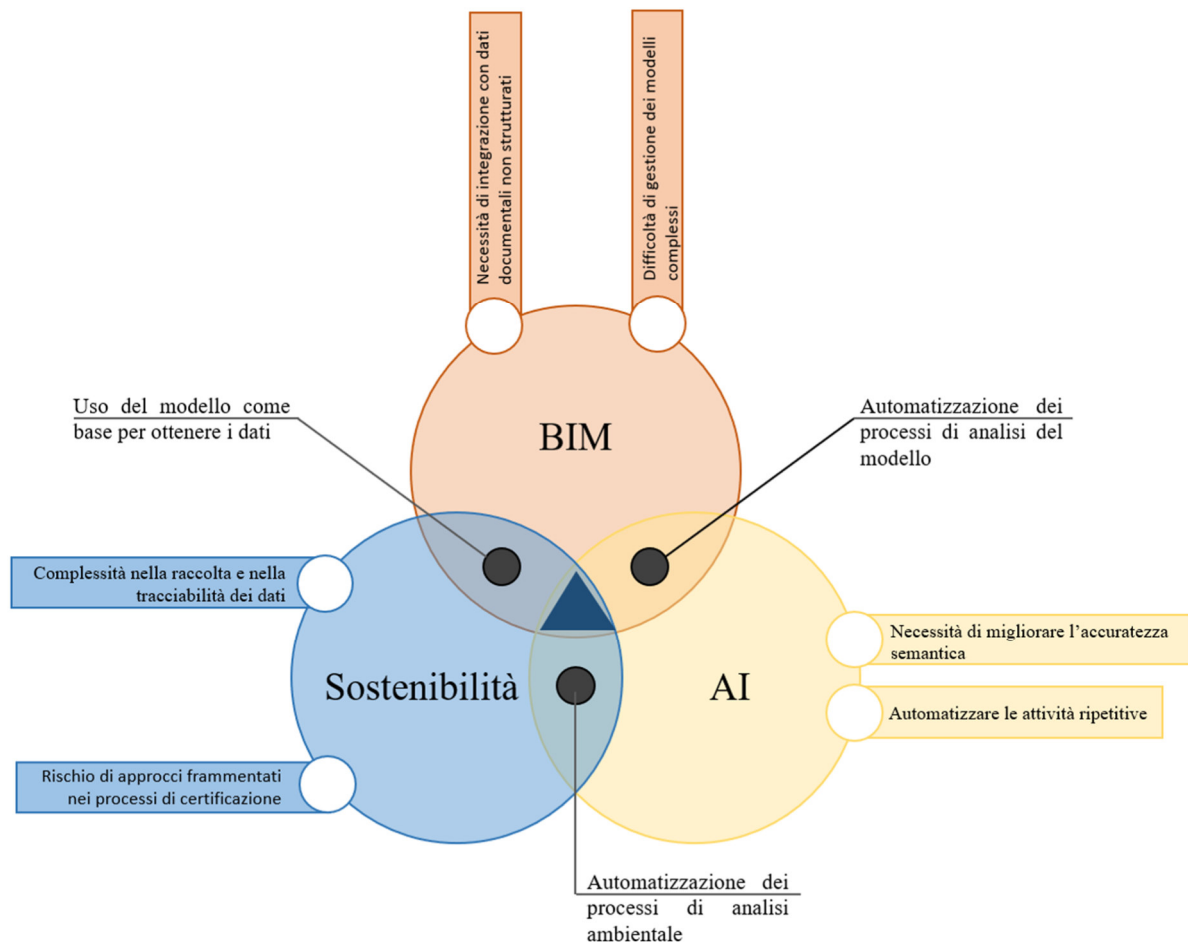


Figura 17 – BIM-AI-Sostenibilità diagramma dei gap

L'intersezione centrale tra i tre domini oggetto di analisi, rappresentata dal triangolo blu, coincide con la domanda di ricerca ovvero: in che modo l'integrazione tra Building Information Modeling (BIM) e strumenti di Intelligenza Artificiale può supportare l'automazione dei processi di gestione del cantiere legati alla sostenibilità?

Questo schema, inoltre, non solo permette di visualizzare il posizionamento della tesi rispetto agli scenari tecnologici emergenti, ma costituisce la base metodologica da cui prende avvio l'analisi applicativa che verrà sviluppata nei capitoli seguenti.

1.4. ESG: principi e applicazioni nel progetto edilizio

Insieme alla digitalizzazione ed all'automazione, anche gli aspetti legati alla sostenibilità stanno acquisendo un ruolo sempre più rilevante. Si parla spesso, infatti, di architettura sostenibile, ovvero di una progettazione volta a minimizzare l'impatto degli edifici sull'ambiente, sia in termini di materiali e di tecniche di costruzione adottate, sia in termini di prestazioni energetiche (esg360.it). Questo sistema di progettare viene definito dalla Treccani con le seguenti parole *“realizzare un'architettura compatibile non solo con la vita dell'uomo e le sue attività, ma anche con l'ambiente naturale e, più in generale, con il contesto in cui si inserisce”*.

La sostenibilità, inoltre, costituisce uno dei parametri fondamentali per la determinazione del rating ESG (Environmental-Social-Governance). Questo consiste in un criterio di valutazione che viene assegnato alle aziende per misurare la loro conformità con i criteri ambientali, sociali e di governance. Il concetto di edilizia sostenibile inizia a prendere piede con la Direttiva europea 31/2010/EU e con l'introduzione degli edifici NZEB (Nearly Zero Energy Building), ovvero costruzioni con fabbisogno energetico molto basso o quasi nullo che dovrebbe essere coperto da energia proveniente da fonti rinnovabili. Tale provvedimento è stato recepito in Italia attraverso il Decreto ministeriale dello Sviluppo economico del 26/06/2015 con una norma che dal 1° gennaio 2021 ha reso obbligatoria la costruzione di nuovi edifici che rispettino i requisiti NZEB. Un altro aspetto chiave è quello legato alla transizione energetica ed al Green Deal che si pone come obiettivo la riduzione delle emissioni climalteranti del 55% entro il 2030 (rispetto al 1990) per raggiungere la neutralità climatica UE entro il 2050 con un ruolo chiave per l'edilizia sostenibile.

In questo quadro, una grande opportunità è rappresentata anche dal Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR), approvato dal Governo italiano nel 2021 come strumento attuativo del programma europeo Next Generation EU. Il PNRR destina i suoi fondi verso sei missioni principali:

- Digitalizzazione, innovazione, competitività e cultura;
- Rivoluzione verde e transizione ecologica;
- Infrastrutture per una mobilità sostenibile;
- Istruzione e ricerca;
- Inclusione e coesione;
- Salute;

Tra queste le Missioni 2 (“Rivoluzione verde e transizione ecologica”) e 5 (“Inclusione e coesione”) sono quelle che più direttamente si intrecciano con i criteri ESG, costituendo il

41,1% dei fondi. L'inserimento dei principi ESG nei processi edilizi non si configura quindi soltanto come un approccio volontario, ma come una condizione strategica per l'accesso ai finanziamenti pubblici e per l'allineamento alle politiche europee di transizione ecologica.

In questi termini gli ESG costituiscono un ruolo cruciale in quanto tengono conto non solo dei miglioramenti in termini quantitativi dal punto di vista energetico e sostenibile, ma anche del comportamento adottato per raggiungere tali risultati.

Nel calcolo del rating ESG l'adozione dell'intelligenza artificiale offre numerosi benefici in termini di accuratezza, efficienza e personalizzazione delle valutazioni. In particolare, l'IA porterebbe vantaggi per quanto riguarda la gestione dei dati, l'oggettività, la comparabilità, il rilevamento di anomalie ed il greenwashing⁵, il monitoraggio in tempo reale e le previsioni degli andamenti futuri.

1.4.1. LEED e GBC Historic Building: protocolli per l'edilizia sostenibile

Per determinare il livello di sostenibilità degli edifici ed in generale delle opere edilizie esistono diversi certificati che permettono di quantificare, verificare e attestare l'impatto ambientale durante l'intero ciclo di vita del manufatto (Ventura, 2019). Tra questi il più utilizzato a livello internazionale è il *Leadership in Energy and Environmental Design* (LEED), mentre a livello nazionale è stato sviluppato il GBC Italia, un protocollo generalmente meno adottato ma che consente di ottenere certificazioni specifiche nel caso di edifici storici vincolati. Il LEED è un sistema volontario, internazionale, nato grazie a U.S. Green Building Council (GBC), che prevede formulazioni differenziate in base al tipo di manufatto che si sta considerando. Il GBC Italia è un'associazione senza scopo di lucro a cui aderiscono imprese e associazioni italiane operanti nell'area dell'edilizia sostenibile. Quest'ultima comprende quattro diversi protocolli di certificazione studiati appositamente per il contesto italiano che comprendono:

- GBC Home (ormai in disuso dopo l'internazionalizzazione del protocollo LEED for Homes sviluppato da USGBC): un sistema di rating sviluppato specificatamente per la realtà abitativa italiana e che promuove la salubrità, la durabilità, l'economicità e le migliori pratiche ambientali nella progettazione e nella costruzione degli edifici.
- GBC Historic Building: applicato nel caso di interventi di conservazione, riqualificazione, recupero e integrazione di edifici storici con diverse destinazioni d'uso.

⁵ Strategia di comunicazione o di marketing perseguita da aziende, istituzioni, enti che presentano come ecosostenibili le proprie attività, cercando di occultarne l'impatto ambientale negativo. (Treccani)

- GBC Quartieri: utile nel caso di interventi volti a promuovere la riqualificazione sostenibile del territorio urbano.
- GBC Condomini: considerato per gli edifici residenziali che necessitano di essere riqualificati.

La certificazione GBC Historic Building, che sarà il protocollo considerato nei capitoli seguenti per analizzare il caso studio della Cavallerizza Reale di Torino, tiene conto di otto aree di valutazione che vengono brevemente descritti nella tabella seguente.

TABELLA 3 – GBC HB: Criteri di valutazione

Parametro di Valutazione	Punti	% di rilevanza	Descrizione
 Valenza Storica	20	18%	Valuta quanto venga preservato ciò che è riconosciuto come avente valore di civiltà, favorendo un elevato livello di sostenibilità.
 Sostenibilità del sito	13	12%	Valuta il rapporto tra l'edificio e l'ambiente circostante ed i potenziali impatti che il manufatto potrebbe generare.
 Gestione delle acque	8	7%	Valuta il contributo dei dispositivi pre-industriali per la raccolta e la gestione delle acque meteoriche
 Energia e atmosfera	29	26%	Valuta l'efficienza energetica ed il retrofit
 Materiali e Risorse	14	13%	Valuta quanto l'intervento si ponga in continuità con l'edificio esistente, mantenendo quanto più possibile il materiale storico, nel rispetto dei principi di sostenibilità.
 Qualità ambientale interna	16	15%	Valuta la conservazione dell'edificio storico e il raggiungimento delle condizioni di comfort e qualità dell'aria interna per gli occupanti.
 Innovazione nella progettazione	6	5%	Premia le pratiche innovative del progetto
 Priorità Regionale	4	4%	Riguarda la valorizzazione di requisiti ambientali prioritari per il contesto territoriale.

Come si può vedere dalla tabella, a ciascuno di questi parametri è assegnato un punteggio la cui somma può arrivare ad un valore massimo pari a 110 punti. Questi permettono di assegnare i livelli di certificazione:

- Base: 40-49 punti conseguiti;
- Argento: 50-59 punti conseguiti;
- Oro: 60-79 punti conseguiti;
- Platino: Più di 80 punti conseguiti.

2. Caso studio: la Cavallerizza Reale di Torino

Inserita nel cuore del centro storico, in una posizione strategica tra i Giardini Reali e l'Auditorium RAI, e parte integrante del sistema delle Residenze Sabaude, la Cavallerizza Reale costituisce uno dei luoghi simbolo della città di Torino, non solo per quanto riguarda il profilo architettonico, ma anche da un punto di vista culturale e identitario. Ciò ha fatto in modo che venisse scelta dalla Fondazione Compagnia di Sanpaolo come bene da recuperare e restaurare, con il fine di restituirlo alla comunità nella forma di uno spazio vivace, inclusivo ed accessibile a tutti. L'obiettivo del progetto è quello di mettere in atto un processo di rigenerazione urbana e sociale, trasformando l'intero complesso in un modello di architettura sostenibile, integrando tecnologie avanzate per l'efficientamento energetico e la riduzione dell'impatto ambientale. La complessità dell'intervento risiede proprio nella necessità di coniugare da un lato la conservazione del valore storico-artistico del luogo sotto la supervisione della Soprintendenza di Archeologia, delle Belle Arti e del Paesaggio, con l'inserimento di funzioni volte a rispondere alle necessità della società contemporanea.

Tra i principali attori coinvolti nel progetto rivestono un ruolo fondamentale sia la collaborazione con Secap S.p.A., un'impresa appartenente al settore delle costruzioni che supporta la progettazione sostenibile mostrando continui miglioramenti dei processi in ambito ESG; sia il contributo di Intesa Sanpaolo che attraverso i propri programmi di investimento a impatto sociale e ambientale sostiene finanziariamente gli interventi di rigenerazione e restauro promuovendo la sostenibilità economica ed ambientale del progetto.

2.1. Evoluzione storica e architettonica della Cavallerizza Reale

La Cavallerizza Reale viene realizzata tra il 1740 ed il 1742 da Benedetto Alfieri, Primo Regio architetto di Carlo Emanuele III, nell'area conosciuta come "Zona di Comando" perché doveva comprendere tutte quelle attività di comando e formazione tra cui: l'Accademia Reale, i maneggi, il Palazzo Reale, gli archivi ed il teatro. La configurazione a forma di croce era stata prevista già nel 1672 nei progetti di Amedeo di Castellamonte (Figura 17) che realizzò i disegni della nuova contrada di Po, i quali prevedevano che il cortile dell'Accademia fosse suddiviso in quattro settori dalle maniche delle Scuderie, realizzate successivamente tra il 1680 ed il 1686, che si dipartivano da un vano circolare (la Rotonda) che doveva essere utilizzata come cavallerizza.



Figura 18 - Il complesso dell'Accademia e della Cavallerizza secondo il progetto di Amedeo di Castellamonte, 1674 (da *Theatrum Sabaudiae*, I). - museotorino.it

Successivamente, nel 1740 Benedetto Alfieri (Figura 18) modificò il progetto iniziale spostando la Cavallerizza al posto della manica orientale della croce castellamontiana. Il nuovo edificio si doveva configurare come un'unica navata su due piani, con una larghezza quasi doppia rispetto a quella prevista da Castellamonte ed una lunghezza di oltre 73 metri. Per la Rotonda era, inoltre, prevista una radicale trasformazione in atrio al piano terreno e in una cappella, sormontata da una cupola, ai piani superiori, ad uso dell'Accademia. Questi interventi, però, non furono mai completati: sebbene il Maneggio e la "Rotonda" siano stati collegati, vennero entrambi ridimensionati rispetto al progetto originale ideato da Alfieri (Aparo, 2022).



Figura 19 -Benedetto Alfieri, *Le due testate di detta Cavallerizza. Spaccato in lungo della medesima con la paggeria* (1763). Archivio di Stato di Torino, Corte.

Il complesso subì ulteriori modifiche nel 1832, quando il Primo Architetto Idraulico Carlo Bernardo Mosca, nominato dal sovrano Carlo Alberto nel 1831, venne incaricato di progettare la manica delle Scuderie Reali. Per ideare il nuovo edificio Mosca riprese sia lo schema castellamontiano a corti simmetriche sia l'allineamento del progetto alfieriano (Babenko, 2022).

La manica del Mosca si inserisce a “F” tra la Cavallerizza Alfieriana ed i giardini Reali dandole l'aspetto di un edificio solido, massiccio e pienamente razionale, costituita al piano terra da un'aula voltata con fronte porticato e tre piani soprastanti per le abitazioni di servizio.

Il declino del complesso della Cavallerizza Reale iniziò con il trasferimento della capitale da Torino a Firenze nel 1865.

È solo con l'arrivare dei primi anni del '900 che l'area riprese vita grazie alla vicinanza delle nuove sedi dell'Università di Torino. Nel 1997 la Cavallerizza Reale entra a far parte del Patrimonio Mondiale dell'Umanità dell'UNESCO nel sistema delle Residenze Sabaude, per poi essere ceduta nel 2007 dal Demanio alla città di Torino, che l'ha successivamente ceduta a sua volta alla “Società Cartolarizzazione Città di Torino”.

Nel 2020 Il Comune di Torino, in accordo con C.D.P. Investimenti s.g.r., Studio Architetto Magnaghi e AI Engineering, ha elaborato un Progetto Unitario di Riqualificazione riguardante l'intero comparto che viene, quindi, suddiviso in Aree Minime di Intervento.

A seguito dell'emanazione del bando comunale e della successiva asta pubblica, nell'ottobre 2021 l'Università di Torino e la Fondazione Compagnia di San Paolo si sono aggiudicate il Lotto 5 della Cavallerizza Reale, comprendente anche la Manica del Mosca. Viene, così, avviato un processo di rigenerazione che vede coinvolti diversi partner istituzionali, tecnici e finanziari, tra cui SECAP s.p.a., con l'obiettivo condiviso di realizzare un intervento sostenibile dal punto di vista ambientale, sociale ed economico, capace di restituire valore culturale e urbano all'intera comunità.

2.2. Il nuovo progetto

2.2.1. Identificazione dell'intervento

Nel 2022 la Fondazione Compagnia di San Paolo ha indetto un concorso di progettazione con l'obiettivo di trasformare la Cavallerizza Reale in un nuovo polo culturale situato nel centro della città di Torino. Il progetto vincitore, ad opera dello studio Cino Zucchi Architetti, prevede una riconversione funzionale per l'Ala del Mosca, dove si insedierà la nuova sede della Fondazione, e per le Pagliere, dove verrà realizzato un hub culturale con funzioni espositive e ricreative.

Considerando la complessità dell'intervento, il cantiere è stato diviso in tre lotti distinti:

- Lotto 1 (UMI 5 – Figura 19): l'Ala del Mosca, per il quale sono previsti interventi di recupero e restauro sull'edificio esistente ed i cui piani superiori saranno destinati ad ospitare i nuovi uffici della Fondazione Compagnia di San Paolo, mentre il piano terra sarà a servizio del pubblico;
- Lotto 2 (UMI 10 – Figura 19): l'edificio delle Pagliere dove, a differenza del caso precedente, verranno messi in atto interventi di ristrutturazione edilizia compatibili con il valore storico-architettonico e che sarà interamente ad uso pubblico;
- Lotto 3 (UMI 11 – Figura 19): la Piazzetta Fratelli Vasco ed il Passaggio Chiabrese che verranno realizzati alla fine del progetto e che avranno la funzione di mettere in comunicazione gli altri due corpi precedentemente descritti.

Viene di seguito riportata la pianta del piano terra inserita nella relazione generale del progetto dove vengono indicate le unità minime di intervento.

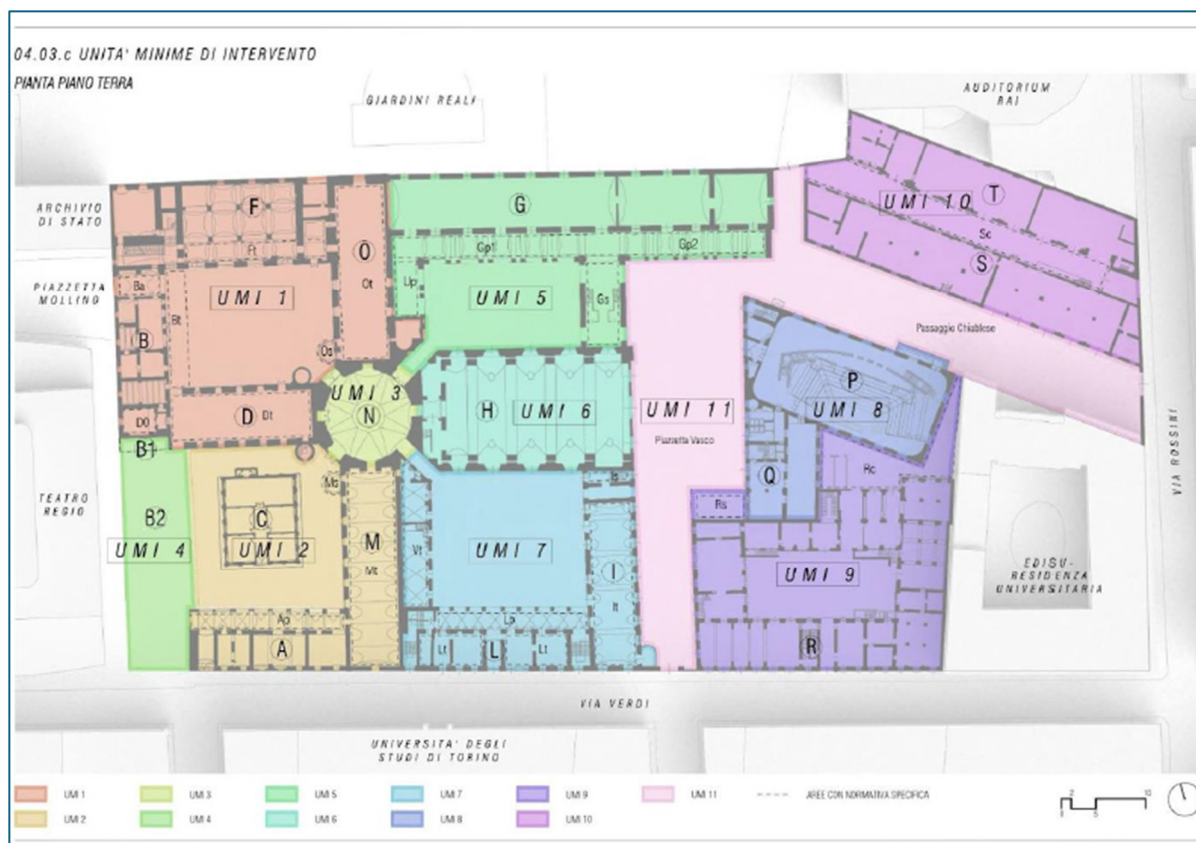


Figura 20 - Unità minime di intervento – Relazione generale del progetto esecutivo fornito da Secap S.p.A.

Ad accrescere ulteriormente la complessità del cantiere, oltre alle dimensioni dell'area oggetto di intervento, contribuiscono ulteriori fattori critici quali:

- la natura storica dell'edificio, soggetto alla tutela della Soprintendenza che richiede una continua interazione con gli ordini di controllo;
- la localizzazione in pieno centro città, al confine con l'Auditorium RAI e con una sede dell'Università di Torino, come si può vedere dalla figura precedente, che amplifica le difficoltà logistiche legate ai trasporti, alla gestione dei rumori ed alla sicurezza degli utenti della zona;
- la presenza di numerosi soggetti coinvolti (imprese subappaltatrici e consulenti specialisti), con conseguente complessità nella gestione e nel coordinamento delle attività di cantiere e con un conseguente aumento del rischio di sovrapposizioni e ritardi.

Lo schema che segue mostra le figure coinvolte nelle varie fasi del cantiere della Cavallerizza Reale partendo dai componenti della committenza per poi proseguire con la ramificazione degli attori coinvolti nelle varie attività. In particolare, si possono contare 7 consulenti specialisti ed almeno 14 imprese subappaltatrici, rendendo indispensabile l'adozione di strumenti digitali in grado di garantire un flusso informativo coerente, aggiornato e facilmente accessibile.

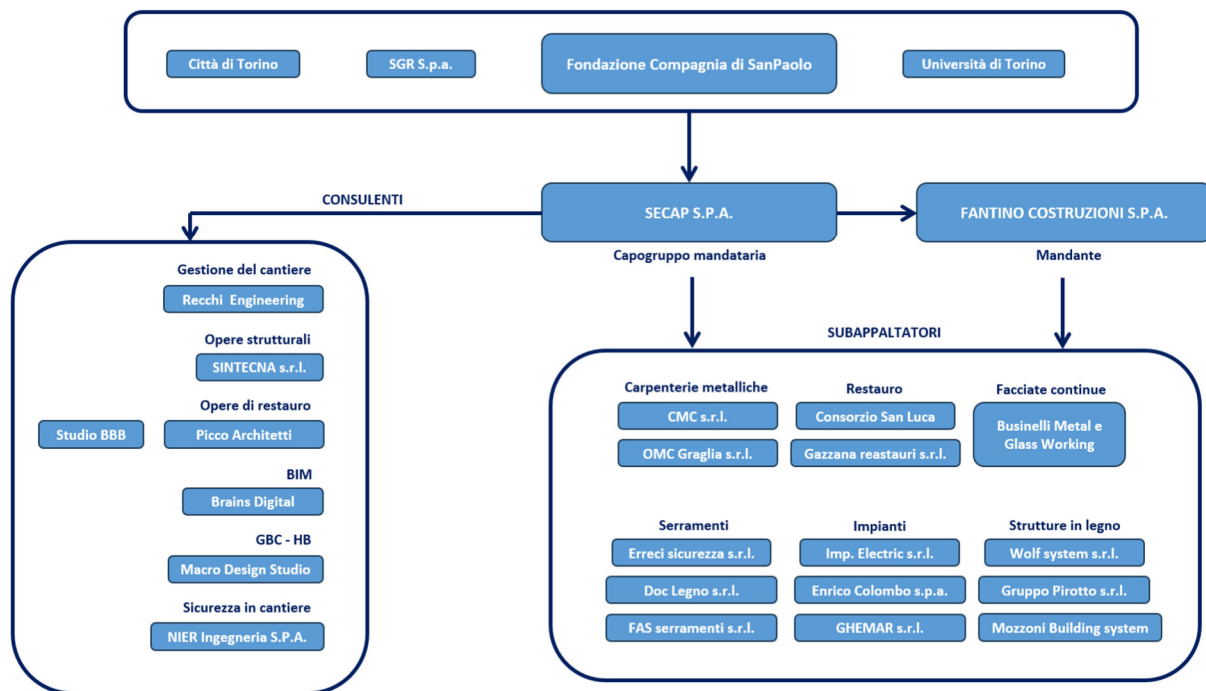


Figura 21 - Figure coinvolte nel cantiere della Cavallerizza Reale

Nei capitoli seguenti verrà considerata solamente la porzione di intervento riguardante il Lotto 1 – Ala del Mosca. In tale ambito progettuale sono previsti il mantenimento dei portici esistenti con l’inserimento di una nuova parete vetrata a delimitazione del portico sud prospiciente il cortile del Mosca; la demolizione dello scalone principale collocato nella manica tra il cortile del Mosca e Piazzetta Vasco, sostituito anch’ esso con una parete vetrata; l’apertura di un varco nel portico affacciato su piazzetta Vasco al fine di garantire la connessione tra l’edificio del Mosca, le Pagliere ed i Giardini Reali. Sono, inoltre, previsti l’inserimento di superfici soppalcate, la demolizione di porzioni di impalcati orizzontali all’interno del corpo di fabbrica, nonché la modifica di parte delle coperture rivolte verso i Giardini Reali. L’insieme di tali interventi mira a conferire al fabbricato una nuova funzionalità in linea con le esigenze di rigenerazione urbana e di sostenibilità che caratterizzano l’intero progetto rispettando, allo stesso tempo, i vincoli storici ed architettonici.



Figura 22 - Render della Piazzetta Fratelli Vasco vista dall'ingresso di via Verdi, infobuild

La complessità del cantiere precedentemente evidenziata mette in risalto la necessità di attuare strategie avanzate di gestione informativa. In un contesto del genere l'adozione di metodologie digitali basate sull'integrazione tra BIM e intelligenza artificiale costituisce una risorsa fondamentale per garantire il controllo dei processi, l'efficienza operativa e la conformità ai requisiti di sostenibilità richiesti dal protocollo GBC HB.

2.2.2. La gestione informativa

In un progetto di elevata complessità e dimensioni quale quello della Cavallerizza Reale di Torino, la gestione informativa assume un ruolo centrale, soprattutto in questo quadro normativo in cui la metodologia BIM è diventata obbligatoria per gli appalti pubblici dopo l'emanazione del decreto D. Lgs 36/2023. Nel progetto considerato come caso studio la gestione dei flussi informativi è stata gestita mediante l'adozione di un modello BIM Federato⁶, un sistema in grado di integrare i diversi contributi disciplinari e di garantire un adeguato livello di coordinamento tra i soggetti coinvolti.

Il capitolato di gestione informativa prevede che gli elaborati vengano prodotti e condivisi in formato .dwg o .pdf, e che siano esportati dal modello BIM, la cui consegna ufficiale è richiesta in formato IFC, in coerenza con quanto richiesto dagli standard di interoperabilità previsti a

⁶ Con l'espressione modello BIM federato si fa riferimento ad un insieme di modelli 3D relativi a specifiche discipline che vengono uniti in un'unica vista per creare un modello digitale completo dell'edificio che sia pluridisciplinare e omnicomprensivo.

livello internazionale dalla norma ISO 16739. L'elevata quantità di informazioni e di documenti redatti, pari a oltre 665 elaborati, ha reso necessario predisporre un adeguato sistema di nomenclatura e codifica ispirato agli standard definiti dalla UNI 11337 e dalla ISO 19650.

Per quanto riguarda i modelli BIM si è adottata la codifica seguente:

n° Progetto		Fase progettuale		Disciplina		UMI		Tipo di file/elaborato	Progressivo
CAVA	_	3	_	ARC	_	05	_	M3	001

Figura 23- Sistema di codifica dei modelli BIM

Gli elaborati grafici, invece, hanno seguito il sistema di codifica di seguito riportato:

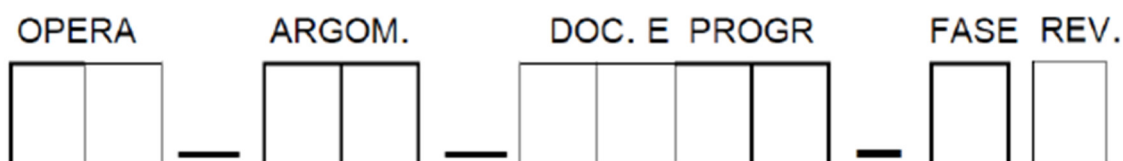


Figura 24 – Sistema di codifica dei documenti

Per lo scambio dei file in fase di progettazione si è scelto di utilizzare come CDE la piattaforma Autodesk Construction Cloud – Modulo Docs, in modo da garantire l'accessibilità e la sincronizzazione delle informazioni tra i membri del team. Nella fase esecutiva, invece, è stata avviata una collaborazione con Brains Digital, finalizzata a testare la nuova piattaforma collaborativa BimPool, con l'intento di facilitare la gestione dei flussi informativi e di introdurre sistemi di analisi innovativi attraverso l'integrazione di tool di intelligenza artificiale.

2.2.3. Il protocollo GBC HB nel cantiere della Cavallerizza Reale

Il progetto di rigenerazione della Cavallerizza Reale di Torino è stato pensato con l'obiettivo di conseguire la Certificazione Oro secondo il protocollo GBC Historic Building. Come anticipato nel paragrafo 1.4.1. ciò implica l'ottenimento di un punteggio complessivo compreso tra 60 e 79 crediti.

Vengono di seguito riportate le Check List proposte nei Capitolati GBC Historic Building rispettivamente dell'Ala del Mosca e delle Pagliere, dove sono indicati i crediti che si intende perseguire. In particolare, si distinguono i requisiti da soddisfare in fase di progettazione (P) e di costruzione (C). Il valore riportato nella colonna "Y" indica il numero di punti che si intende raggiungere per quel determinato credito, mentre i valori appartenenti alla colonna "N" sono i punti che mancano per raggiungere il valore massimo previsto per quel credito, ma che non si ha intenzione di perseguire.

Valenza storica		Y	?	N
Prereq 1	Indagini conoscitive preliminari	P		
Credito 1.1	Indagini conoscitive avanzate: indagini energetiche	P	2	1
Credito 1.2	Indagini conoscitive avanzate: indagini diagnostiche su materiali e forme di degrado	P/C	2	
Credito 1.3	Indagini conoscitive avanzate: indagini diagnostiche sulle strutture e monitoraggio strutturale	C	2	1
Credito 2	Reversibilità dell'intervento conservativo	P		2
Credito 3.1	Compatibilità della destinazione d'uso e benefici insediativi	P	2	
Credito 3.2	Compatibilità chimico-fisica delle malte per il restauro	C	2	
Credito 3.3	Compatibilità strutturale rispetto alla struttura esistente	C	2	
Credito 4	Cantiere di restauro sostenibile	C	1	
Credito 5	Piano di manutenzione programmata	C	2	
Credito 6	Specialista in beni architettonici e del paesaggio	P	1	
Sostenibilità del Sito				
Prereq 1	Prevenzione dell'inquinamento da attività di cantiere	C		
Credito 1	Recupero e riqualificazione di siti degradati	P	2	
Credito 2.1	Trasporti alternativi: accesso ai trasporti pubblici	P	1	
Credito 2.2	Trasporti alternativi: portabiciclette e spogliatoi	P		1
Credito 2.3	Trasporti alternativi: veicoli a bassa emissione e a carburante alternativo	P		1
Credito 2.4	Trasporti alternativi: capacità dell'area di parcheggio	P	1	
Credito 3	Sviluppo del sito: recupero degli spazi aperti	P	2	
Credito 4	Acque meteoriche: controllo della quantità e della qualità	P	2	
Credito 5	Effetto isola di calore: superfici esterne e coperture	C	2	
Credito 6	Riduzione inquinamento luminoso	P	1	
Gestione delle Acque				
Prereq 1	Riduzione dell'uso di acqua	P/C		
Credito 1	Riduzione dell'uso di acqua per usi esterni	P	1	2
Credito 2	Riduzione dell'uso dell'acqua	P/C	3	
Credito 3	Contabilizzazione dell'acqua consumata	P	2	
Energia e Atmosfera				
Prereq 1	Commissioning di base dei sistemi energetici	C		
Prereq 2	Prestazioni energetiche minime	P		
Prereq 3	Gestione di base dei fluidi refrigeranti	P		
Credito 1	Ottimizzazione delle prestazioni energetiche	P	10	7
Credito 2	Energie rinnovabili	P	6	
Credito 3	Commissioning avanzato dei sistemi energetici	C	2	
Credito 4	Gestione avanzata dei fluidi refrigeranti	P	1	
Credito 5	Misure e collaudi	C	3	
Materiali e Risorse		Y	?	N
Prereq 1	Raccolta e stoccaggio dei materiali riciclabili	P		
Prereq 2	Gestione dei rifiuti da demolizione e costruzione	C		
Prereq 3	Riutilizzo degli edifici	C		
Credito 1	Riutilizzo degli edifici: mantenimento degli elementi tecnici e delle finiture esistenti	C	3	
Credito 2	Gestione dei rifiuti da demolizione e costruzione	C	1	1
Credito 3	Riutilizzo dei materiali	C		2
Credito 4	Ottimizzazione ambientale dei prodotti	C	2	3
Credito 5	Materiali estratti, lavorati e prodotti a distanza limitata	C		2
Qualità Ambientale Interna				
Prereq 1	Prestazioni minime per la qualità dell'aria (IAQ)	P		
Prereq 2	Controllo ambientale del fumo di tabacco	P		
Credito 1	Monitoraggio dell'aria ambiente	P	2	
Credito 2	Valutazione della portata minima di aria esterna	P		2
Credito 3.1	Piano di gestione della qualità dell'aria indoor: fase di cantiere	C	1	
Credito 3.2	Piano di gestione della qualità dell'aria indoor: prima dell'occupazione	C		1
Credito 4.1	Materiali basso emissivi: adesivi e sigillanti, materiali cementizi e finiture per il legno	C		1
Credito 4.2	Materiali basso emissivi: vernici e rivestimenti	C		1
Credito 4.3	Materiali basso emissivi: pavimentazioni	C		1
Credito 4.4	Materiali basso emissivi: prodotti in legno composito e fibre vegetali	C		1
Credito 5	Controllo delle fonti chimiche e inquinanti indoor	P		1
Credito 6.1	Controllo e gestione degli impianti: illuminazione	P		1
Credito 6.2	Controllo e gestione degli impianti: comfort termico	P	1	
Credito 7.1	Comfort termico: progettazione	P	1	
Credito 7.2	Comfort termico: verifica	P	2	
Innovazione nella Progettazione				
Credito 1	Innovazione nella progettazione - PE SS 2.1	P/C	1	
	Innovazione nella progettazione - Green Education	P	1	
	Innovazione nella progettazione - CREDITO PILOTA: CP104_ Conoscenza del rischio sismico	P/C	1	
	Innovazione nella progettazione - MR4	P	1	
	Innovazione nella progettazione - PE VS4 - musealizzazione cantiere	C	1	
Credito 2	Professionalista accreditato GBC	P	1	
Priorità Regionale - AREA CONTINENTALE				
	Priorità regionale - VS 1.1	P	1	
	Priorità regionale - VS 5	P	1	
	Priorità regionale - SS 3	P	1	
	Priorità regionale - QI 1	P	1	
		78	0	32

Figura 25 - Check List dei crediti GBC HB previsti per l'Ala del Mosca

Dall'analisi della Check List dell'Ala del Mosca emerge che dei 78 punti che si prevede di raggiungere 16 appartengono alla disciplina della "Valenza storica", 11 al tema della "Sostenibilità del sito", 6 alla "Gestione delle acque", 22 al tema dell'"Energia dell'atmosfera", 6 ai "Materiali e Risorse", 6 alla "Qualità ambientale interna", 6 all'"Innovazione nella progettazione", 4 alla "Priorità Regionale". In particolare, 50 crediti sono previsti in fase di progettazione, mentre 28 in fase di costruzione, di cui 6 (pari al 21,4% del totale dei crediti di costruzione) appartengono alla categoria Materiali e Risorse. Quest'ultima sezione tematica riveste un ruolo centrale nel presente lavoro di tesi in quanto comprende alcuni dei crediti che richiedono una maggiore elaborazione di dati tecnico-informativi. La complessità delle operazioni manuali richieste per svolgere le analisi previste per l'ottenimento dei punti

appartenenti a quest'area tematica rende particolarmente significativa la sperimentazione di metodologie innovative basate sul BIM e sull'intelligenza artificiale, con l'obiettivo di automatizzare parte di questi processi di verifica e di semplificare il raggiungimento della certificazione.

Valenza storica			Y	?	N	Materiali e Risorse			Y	?	N
Prereq 1	Indagini conoscitive preliminari	P				Prereq 1	Raccolta e stoccaggio dei materiali riciclabili	P			
Credito 1.1	Indagini conoscitive avanzate: indagini energetiche	P	2		1	Prereq 2	Gestione dei rifiuti da demolizione e costruzione	C			
Credito 1.2	Indagini conoscitive avanzate: indagini diagnostiche su materiali e forme di degrado	P/C	2			Prereq 3	Riutilizzo degli edifici	C			
Credito 1.3	Indagini conoscitive avanzate: indagini diagnostiche sulle strutture e monitoraggio strutturale	C	2		1	Credito 1	Riutilizzo degli edifici: mantenimento degli elementi tecnici e delle finiture esistenti	C			3
Credito 2	Reversibilità dell'intervento conservativo	P			2	Credito 2	Gestione dei rifiuti da demolizione e costruzione	C	1		
Credito 3.1	Compatibilità della destinazione d'uso e benefici insediativi	P	2			Credito 3	Riutilizzo dei materiali	C			2
Credito 3.2	Compatibilità chimico-fisica delle malte per il restauro	C	2			Credito 4	Ottimizzazione ambientale dei prodotti	C	2		3
Credito 3.3	Compatibilità strutturale rispetto alla struttura esistente	C	2			Credito 5	Materiali estratti, lavorati e prodotti a distanza limitata	C			2
Credito 4	Cantiere di restauro sostenibile	C	1			Qualità Ambientale Interna					
Credito 5	Piano di manutenzione programmata	C	2			Prereq 1	Prestazioni minime per la qualità dell'aria (IAQ)	P			
Credito 6	Specialista in beni architettonici e del paesaggio	P	1			Prereq 2	Controllo ambientale del fumo di tabacco	P			
Sostenibilità del Sito						Credito 1	Monitoraggio dell'aria ambiente	P	2		
Prereq 1	Prevenzione dell'inquinamento da attività di cantiere	C				Credito 2	Valutazione della portata minima di aria esterna	P			2
Credito 1	Recupero e riqualificazione di siti degradati	P	2			Credito 3.1	Piano di gestione della qualità dell'aria indoor: fase di cantiere	C	1		
Credito 2.1	Trasporti alternativi: accesso ai trasporti pubblici	P	1			Credito 3.2	Piano di gestione della qualità dell'aria indoor: prima dell'occupazione	C			1
Credito 2.2	Trasporti alternativi: portabiciclette e spogliatoi	P			1	Credito 4.1	Materiali basso emissivi: adesivi e sigillanti, materiali cementizi e finiture per il legno	C			1
Credito 2.3	Trasporti alternativi: veicoli a bassa emissione e a carburante alternativo	P			1	Credito 4.2	Materiali basso emissivi: vernici e rivestimenti	C			1
Credito 2.4	Trasporti alternativi: capacità dell'area di parcheggio	P	1			Credito 4.3	Materiali basso emissivi: pavimentazioni	C			1
Credito 3	Sviluppo del sito: recupero degli spazi aperti	P	2			Credito 4.4	Materiali basso emissivi: prodotti in legno composito e fibre vegetali	C			1
Credito 4	Acque meteoriche: controllo della quantità e della qualità	P			2	Credito 5	Controllo delle fonti chimiche e inquinanti indoor	P			1
Credito 5	Effetto isola di calore: superfici esterne e coperture	C	2			Credito 6.1	Controllo e gestione degli impianti: illuminazione	P			1
Credito 6	Riduzione inquinamento luminoso	P	1			Credito 6.2	Controllo e gestione degli impianti: comfort termico	P	1		
Gestione delle Acque						Credito 7.1	Comfort termico: progettazione	P	1		
Prereq 1	Riduzione dell'uso di acqua	P/C				Credito 7.2	Comfort termico: verifica	P	2		
Credito 1	Riduzione dell'uso di acqua per usi esterni	P	1		2	Innovazione nella Progettazione					
Credito 2	Riduzione dell'uso dell'acqua	P/C	3			Credito 1	Innovazione nella progettazione - PE SS 2.1	P/C	1		
Credito 3	Contabilizzazione dell'acqua consumata	P	2				Innovazione nella progettazione - Green Education	P	1		
							Innovazione nella progettazione - CREDITO PILOTA: CP104_ Conoscenza del rischio sismico	P/C	1		
Energia e Atmosfera							Innovazione nella progettazione - PE MR4	P	1		
Prereq 1	Commissioning di base dei sistemi energetici	C					Innovazione nella progettazione - PE VS4 - musealizzazione cantiere	C	1		
Prereq 2	Prestazioni energetiche minime	P				Credito 2	Professionista accreditato GBC	P	1		
Prereq 3	Gestione di base dei fluidi refrigeranti	P				Priorità Regionale - AREA CONTINENTALE					
Credito 1	Ottimizzazione delle prestazioni energetiche	P	10		7		Priorità regionale - VS 1.1	P	1		
Credito 2	Energie rinnovabili	P	6				Priorità regionale - VS 5	P	1		
Credito 3	Commissioning avanzato dei sistemi energetici	C	2				Priorità regionale - SS 3	P	1		
Credito 4	Gestione avanzata dei fluidi refrigeranti	P	1				Priorità regionale - QI 1	P	1		
Credito 5	Misure e collaudi	C	3								
										73	0

Figura 26 - Check List GBC HB crediti previsti per la manica delle Pagliere

Per quanto riguarda il lotto delle Pagliere la distribuzione dei crediti è simile a quella del Mosca ma si prevede di raggiungere 73 crediti invece di 78.

Considerata la natura condivisa degli spazi esterni, si procederà trattando i crediti relativi a questo lotto con l'applicazione dello schema di certificazione GBC HB in modalità aggregata.

3. Metodologia applicata: il Framework

I capitoli precedenti hanno messo in evidenza come, il problema della condivisione delle informazioni e l'esecuzione di analisi ripetitive, rappresentino un fattore di criticità con ricadute in termini di tempi e di qualità nel processo edilizio. L'attuale progetto della Cavallerizza Reale di Torino ne costituisce un esempio emblematico essendo caratterizzato da un elevato numero di attori coinvolti e da una significativa quantità di dati da gestire. In uno scenario del genere nasce un quesito centrale: può, l'intelligenza artificiale, fornire un supporto concreto nell'attività di ricerca delle informazioni e nell'automazione dei processi? A tale interrogativo hanno cercato di rispondere SECAP S.p.A., impresa edile torinese vincitrice insieme all'impresa Fantino Costruzioni dell'appalto bandito dalla committenza Fondazione Intesa San Paolo per eseguire i lavori, e Brains Digital, società specializzata nell'implementazione di strategie BIM e soluzioni innovative nell'ambito della digital transformation dell'ambiente costruito. La collaborazione tra i due soggetti si concretizza nella sperimentazione della nuova piattaforma collaborativa BimPool-AI: un sistema che integra strumenti di gestione informativa e tecnologie di intelligenza artificiale generativa, finalizzata ad ottimizzare i processi di analisi, a ridurre le attività manuali ripetitive e a rendere più efficiente la fruibilità dei dati di progetto rispetto ad un tradizionale ambiente CDE.

L'obiettivo della presente tesi è quello di individuare una metodologia replicabile per automatizzare le operazioni ripetitive previste nella fase di costruzione, concentrandosi sui requisiti di efficientamento energetico e sull'ottenimento della certificazione GBC HB. In particolare, il caso studio analizzato riguarda l'Ala del Mosca del complesso della Cavallerizza Reale e verrà testato il potenziale offerto dalla piattaforma BimPool-AI per la gestione delle informazioni e per la semplificazione del processo di acquisizione dei crediti appartenenti alla sezione "Materiali e Risorse" perseguibili in fase di costruzione. Come anticipato, è stato scelto di focalizzarsi su questa sezione in quanto particolarmente onerosa dal punto di vista operativo e quindi ideale per testare il potenziale di automazione offerto dall'intelligenza artificiale. Ci si concentrerà, quindi, sulle seguenti voci previste nella Check List dell'edificio del Mosca:

Materiali e Risorse			Y	?	N
Prereq 1	Raccolta e stoccaggio dei materiali riciclabili	P			
Prereq 2	Gestione dei rifiuti da demolizione e costruzione	C			
Prereq 3	Riutilizzo degli edifici	C			
Credito 1	Riutilizzo degli edifici: mantenimento degli elementi tecnici e delle finiture esistenti	C	3		
Credito 2	Gestione dei rifiuti da demolizione e costruzione	C	1		1
Credito 3	Riutilizzo dei materiali	C			2
Credito 4	Ottimizzazione ambientale dei prodotti	C	2		3
Credito 5	Materiali estratti, lavorati e prodotti a distanza limitata	C			2

Figura 27 - Porzione dei requisiti della CheckList GBC HB analizzata

3.1. BIMPOOL-AI: Intelligenza artificiale per la gestione dei dati BIM

BimPool-AI è una piattaforma collaborativa, sviluppata da Brains Digital, in grado di dialogare in linguaggio naturale e di automatizzare quelle attività ripetitive che generalmente sono affidate ai professionisti del settore, distraendoli da attività con un più alto livello di complessità. L'obiettivo della piattaforma è quello di superare la frammentazione tipica dei sistemi informativi tradizionali, promuovendo un ecosistema integrato e intelligente basato su un Grafo della Conoscenza (Knowledge Graph) che, attraverso un processo di embedding⁷, raccoglie e analizza i dati caricati. Il processo di Data Integration è realizzato mediante il protocollo MCP (Multi-Channel Processing), ovvero un protocollo aperto e universale che standardizza le modalità di connessione tra i modelli di intelligenza artificiale e fonti eterogenee di dati. Tale approccio consente a diversi Large Language Model (LLM) di interfacciarsi con documenti in formati diversi (PDF, RVT, XLSX, IFC) garantendone l'interoperabilità. L'analisi dei dati viene eseguita tramite RAG (Retrieval-Augmented Generation), ovvero un'architettura AI che interroga il Knowledge Graph e genera risposte in linguaggio naturale. Questo sistema fa in modo che l'output del modello AI sia *grounded* ai dati caricati sulla piattaforma, riducendo il rischio che si verifichi il fenomeno dell'*hallucination*, ovvero la generazione di contenuti non verificati o inventati.

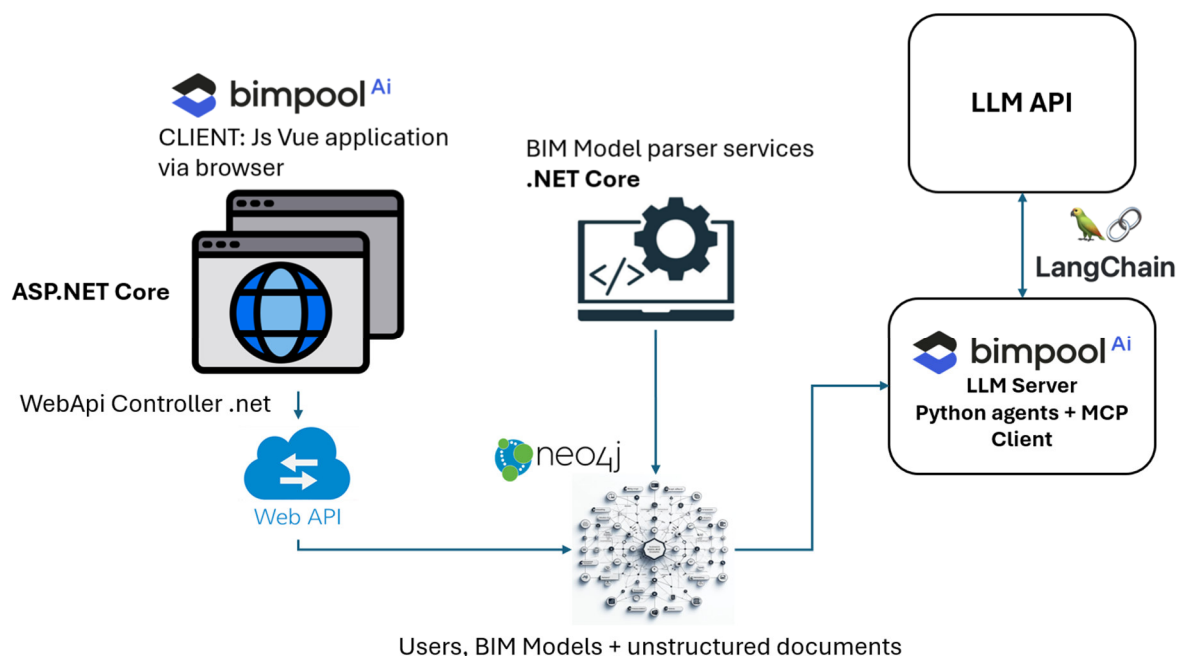


Figura 28 - Struttura rappresentativa del funzionamento della piattaforma BimPool-AI

⁷ L'embedding è un metodo di rappresentazione dei dati che consente di codificarli come vettori numerici in uno spazio multidimensionale, rendendoli comprensibili dai modelli AI. (monade.io)

L'architettura della piattaforma si basa su agenti Python, esposti via API, orchestrati da WebApi Controller .NET che svolge la funzione di gateway e gestisce le richieste provenienti dal client. Quest'ultimo si interfaccia con l'utente tramite l'applicazione web, e trasmette la query al WebApi Controller.Net che elabora la richiesta e la inoltra all'agente Python. Questo, a sua volta, interroga il Grafo della Conoscenza (rappresentato da neo4j nella Figura 27) e restituisce una risposta elaborata tramite LLM al Controller NET che la recapita al client.

Utilizzando un sistema di questa tipologia Bimpool-AI consente di condividere velocemente le informazioni, catalogarle e interrogarle ottimizzando tempi e flussi di lavoro. Il tutto interrogando solamente i dati presenti nel Knowledge Graph, senza eseguire crawling indiscriminato sui file system.

L'obiettivo del presente studio è quello di testare questa piattaforma applicando la nuova tecnologia AI ad un progetto complesso, come quello della Cavallerizza Reale di Torino, con lo scopo di testarne punti di forza e limiti, e di individuare una metodologia funzionale e replicabile che permetta di ottimizzare i tempi di analisi e di ridurre le probabilità di errore nella gestione dei crediti previsti dal protocollo GBC HB.

3.1.1. Interfaccia grafica della piattaforma BimPool-AI

L'interfaccia grafica di BimPool-AI è stata concepita secondo principi di usabilità e si presenta come intuitiva ed in linea con gli standard delle piattaforme di collaborazione presenti sul mercato. Quando si accede al progetto la schermata iniziale riporta una sintesi informativa contenente i dati essenziali (nome del progetto, localizzazione, data di inizio e di fine, importo...), utile per inquadrare rapidamente il contesto operativo.

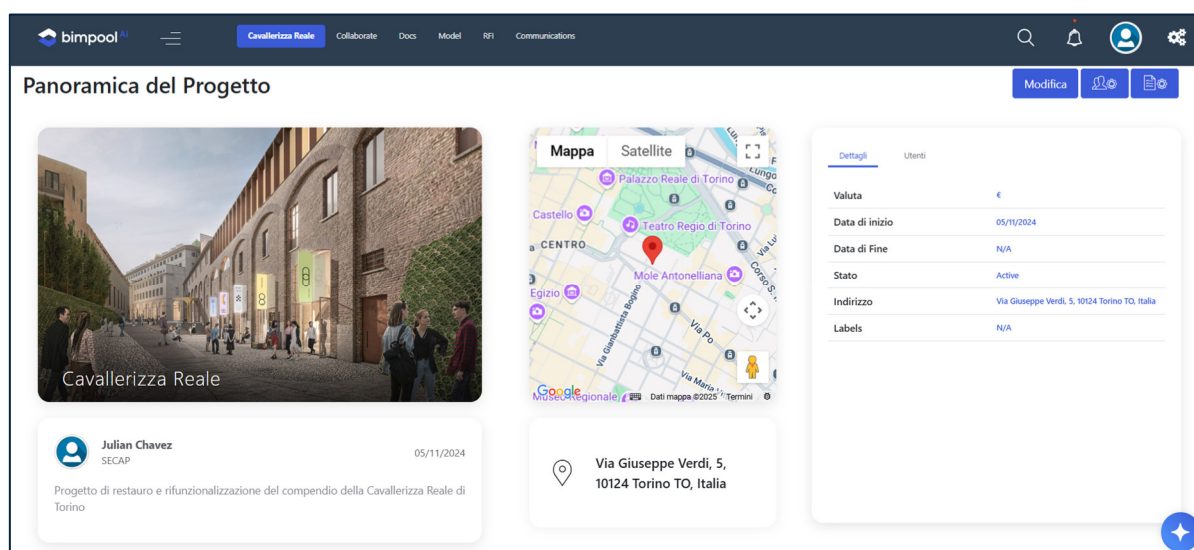
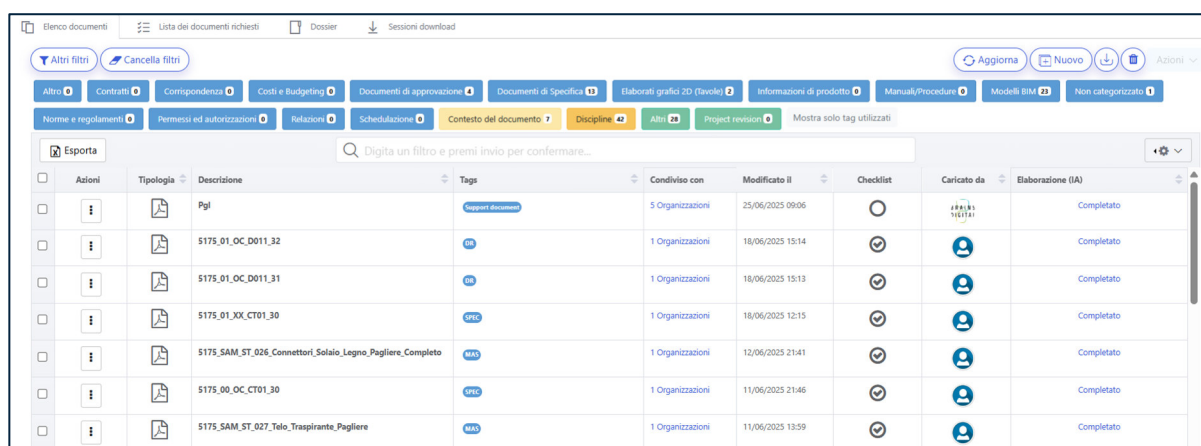


Figura 29 - Schermata iniziale della piattaforma BimPool-AI

Nella finestra *Collaborate* è possibile definire il ruolo e l'organizzazione di appartenenza di ciascun componente del team, consentendo di impostare criteri differenziati di accesso ai documenti e alle funzionalità della piattaforma.

La sezione *Docs* permette, invece, di caricare e condividere i file, che possono essere in formato .pdf, rvt, .ifc, .xlsx. Una volta caricati, i documenti vengono sottoposti al processo di embedding ed inseriti nel Knowledge Graph, che li rende interrogabili dall'intelligenza artificiale. Quando si effettua l'embedding, se non specificato manualmente dall'utente, vengono attribuiti dei tag automatici che facilitano la gestione e la ricerca dei documenti.



Azioni	Tipologia	Descrizione	Tags	Condiviso con	Modificato il	Checklist	Caricato da	Elaborazione (IA)
		Pgi	Support document	5 Organizzazioni	25/06/2025 09:06	☐		Completato
		S175_01_OC_D011_32	OC	1 Organizzazioni	18/06/2025 15:14	☒		Completato
		S175_01_OC_D011_31	OC	1 Organizzazioni	18/06/2025 15:13	☒		Completato
		S175_01_XX_CT01_30	OPC	1 Organizzazioni	18/06/2025 12:15	☒		Completato
		S175_SAM_ST_026_Connettori_Solaio_Legno_Pagliere_Completo	SAM	1 Organizzazioni	12/06/2025 21:41	☒		Completato
		S175_00_OC_CT01_30	OPC	1 Organizzazioni	11/06/2025 21:46	☒		Completato
		S175_SAM_ST_027_Telo_Traspirante_Pagliere	SAM	1 Organizzazioni	11/06/2025 13:59	☒		Completato

Figura 30 - Caricamento dei documenti e assegnazione dei tag

La sezione *Communication/trasmittal* consente di condividere con determinati attori documenti, verbali e altri contenuti per ricevere feedback e approvazioni senza la necessità di ricorrere a canali esterni di comunicazione.

L'integrazione dell'intelligenza artificiale è disponibile per due diversi ambiti:

- L'ambito documentale, tramite l'agente *Smart Explorer for documents*, per interrogare, riassumere o confrontare i contenuti dei documenti caricati;
- L'ambito modello, tramite l'agente *Smart Explorer for Models*, per analizzare i modelli BIM, eseguire confronti tra più discipline ed esplorare informazioni specifiche.

Le conversazioni avviate con gli agenti possono essere salvate e condivise con i membri del team per mostrare risultati e dati ottenuti, garantendo, così, trasparenza e collaborazione.

Nel caso specifico dei modelli BIM, qualora si avessero a disposizione più modelli per più discipline questi possono essere federati all'interno della piattaforma in modo da avere delle analisi integrate su scala interdisciplinare.

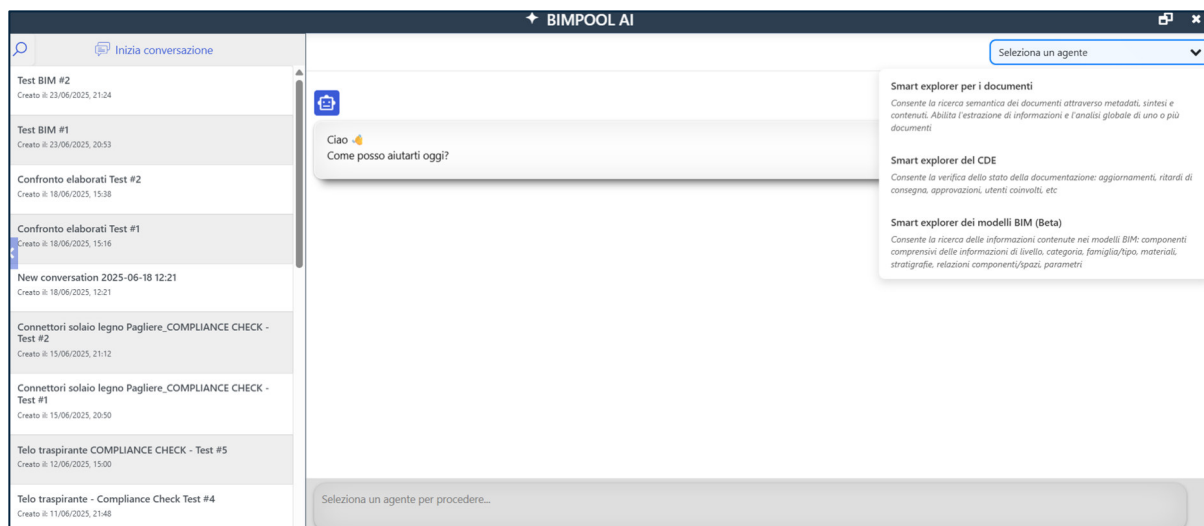


Figura 31 - Esempio di avvio di una conversazione con scelta dell'agente di ricerca

La piattaforma mette a disposizione anche un ulteriore strumento di analisi oltre all'intelligenza artificiale: il modulo *Quantity Take Off* (QTO). Questo strumento è analogo ad un abaco di Revit e permette di calcolare le quantità di elementi presenti all'interno del modello applicando filtri e restrizioni.

Questo costituisce uno dei vantaggi più significativi offerti dalla piattaforma, in quanto consente anche a professionisti non specialisti BIM o privi di una licenza Revit di accedere a informazioni quantitative e parametriche in modo semplice e centralizzato.

Grazie a questa combinazione di strumenti, BimPool-AI estende la possibilità di accedere ai modelli anche a figure non specialistiche, offrendo un livello di intelligenza informativa superiore rispetto a quello di un ambiente di condivisione dati tradizionale.

3.2. Il framework BIM-AI per la sostenibilità: applicazione al caso studio

Al fine di valutare l'efficacia della piattaforma BimPool-AI e di individuare gli ambiti di applicazione in cui il suo utilizzo potrebbe risultare maggiormente vantaggioso, sono state condotte una serie di simulazioni sperimentali finalizzate a testarne le potenzialità nel campo della sostenibilità. In particolare, l'analisi si è concentrata sulla verifica dei crediti previsti per l'ottenimento della certificazione GBC HB descritta nei paragrafi precedenti, con riferimento specifico alla categoria "Materiali e Risorse" conseguibili nella fase di costruzione.

La scelta di concentrare le analisi su questa sezione è dettata dal fatto che i crediti ad essa associati richiedono prevalentemente attività di raccolta, elaborazione e tracciabilità dei dati (come nel caso di certificazioni EPD, Percentuali di riciclato, provenienza delle forniture...), caratterizzate, quindi, da un'elevata ripetitività e da un considerevole dispendio di tempo. Ciò

la rende un terreno ideale per testare l'efficacia di strumenti basati sull'intelligenza artificiale per automatizzare e semplificare le operazioni.

Nei paragrafi seguenti verranno illustrate le simulazioni applicative sviluppate per testare le funzionalità della piattaforma BimPool-AI. Ciascuna di queste è stata impostata partendo dai requisiti riportati nelle Check List del protocollo GBC HB e traducendo le procedure generalmente svolte manualmente in workflow digitali basati sull'integrazione tra BIM e intelligenza artificiale.

A supporto della spiegazione, viene di seguito riportato il flowchart che sintetizza l'intero processo metodologico adottato, evidenziando i passaggi che hanno permesso di arrivare alla definizione degli output e dei KPI. Lo schema, oltre a rappresentare le fasi operative, consente di visualizzare i collegamenti tra gli obiettivi, gli strumenti e le verifiche. I passaggi riportati saranno assunti come riferimento per l'applicazione al caso studio della Cavallerizza Reale e mostrano come la verifica di ciascun credito sia stata automatizzata attraverso quanto riportato nella sezione *Metodologia Applicata* del grafico.

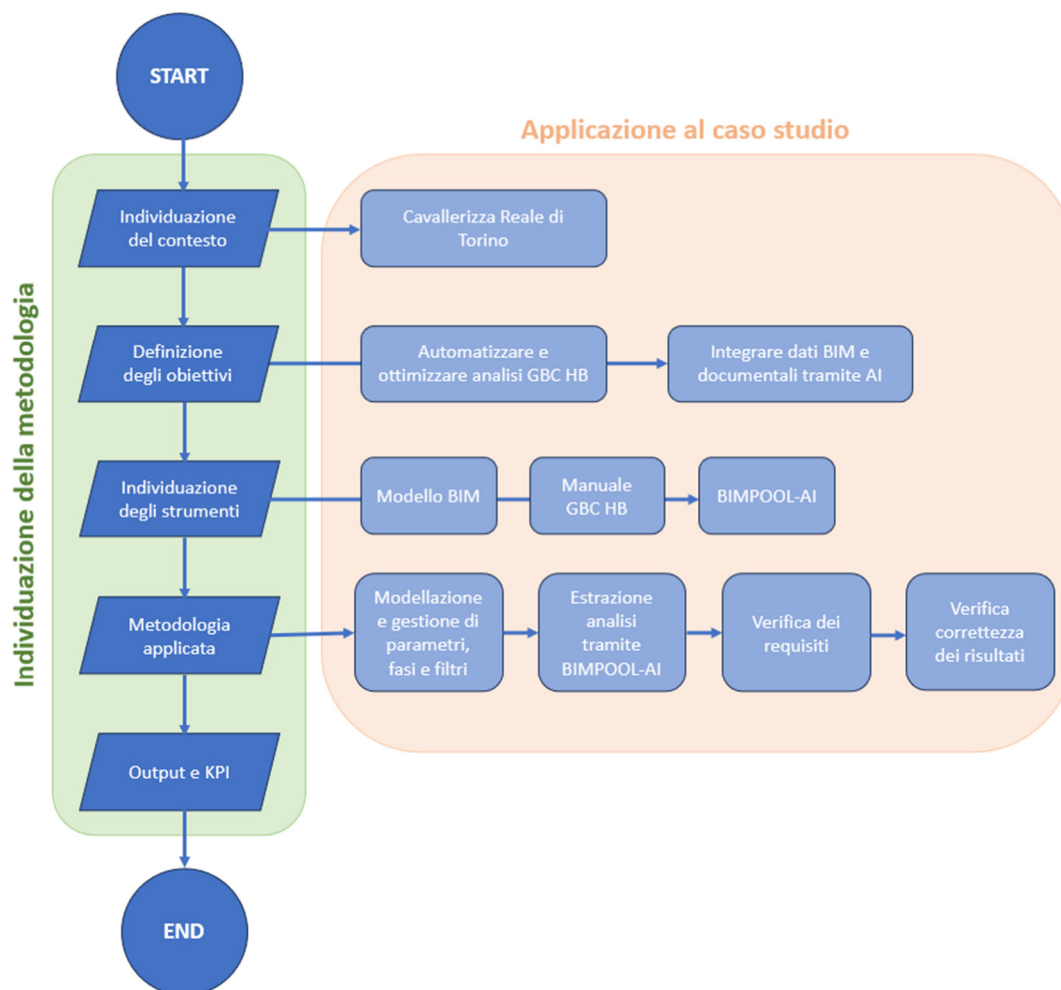


Figura 32 - Procedura seguita per individuare la metodologia applicativa

3.2.1. Gestione dei rifiuti da demolizione e costruzione – MR Prerequisito 2

Per conseguire la certificazione GBC HB oltre a soddisfare il numero minimo di crediti richiesti, è necessario rispettare una serie di prerequisiti obbligatori. Tra questi uno dei più rilevanti nella fase di costruzione che l'impresa affidataria SECAP S.p.A. è tenuta a garantire, riguarda la *Gestione dei rifiuti da demolizione e costruzione*. Secondo quanto riporta il Manuale GBC HB 2016, l'obiettivo del prerequisito è quello di deviare i rifiuti derivanti dalle attività di demolizione e costruzione dal conferimento in discarica o dall'incenerimento, promuovendo il recupero delle risorse riciclabili e il riutilizzo dei materiali presso siti autorizzati. A tal fine occorre inizialmente individuare i materiali di pregio che possono essere riciclati o recuperati e sviluppare un Piano di gestione dei rifiuti da demolizione e costruzione.

Il manuale riporta due diversi approcci operativi:

- *Separazione dei rifiuti in sito*: i materiali di demolizione e di costruzione vengono differenziati direttamente in cantiere per poi essere conferiti a ditte autorizzate per il trasporto ed il trattamento.
- *Separazione off-site*: i materiali vengono prelevati in modo indifferenziato da una o più ditte autorizzate e convenzionate che provvedono alla loro differenziazione e stoccaggio in appositi impianti.

Nel caso specifico del cantiere della Cavallerizza Reale, Secap ha adottato il primo approccio, impegnandosi ad effettuare la separazione dei rifiuti direttamente in sito. Per rispettare il prerequisito la soglia percentuale minima di rifiuti da riciclare o recuperare è pari al 30% in peso dei rifiuti totali.

L'impresa deve pertanto individuare trasportatori e impianti di riciclaggio autorizzati al trattamento, selezionati sulla base del Codice Europeo dei Rifiuti (CER) specifico del materiale. Per confermare che il materiale deviato sia stato riciclato o recuperato come programmato, occorre verificare i Formulare di Identificazione dei Rifiuti (FIR), i quali riportano i codici CER, le autorizzazioni al trasporto e le evidenze del corretto conferimento presso impianti idonei. La verifica del rispetto dei requisiti richiede quindi la gestione di un'elevata quantità di dati reperibili in parte dal modello BIM, in parte dall'analisi dei documenti precedentemente citati. Il flusso informativo così generato si presta in maniera ottimale a processi di digitalizzazione e automazione mediante l'impiego della piattaforma BimPool-AI.

3.2.1.1. Gestione dei rifiuti da demolizione e costruzione - MR Credito 2

Il Credito 2 della categoria *Materiali e Risorse* è strettamente collegato al prerequisito 1 relativo alla gestione dei rifiuti da demolizione e costruzione e permette di ottenere un massimo di 2 crediti. Nel caso dell'Ala del Mosca del cantiere che interessa la Cavallerizza Reale, Secap si è posta come obiettivo il conseguimento di uno di questi due crediti. Per l'ottenimento del credito è necessario, a seconda dell'approccio adottato (separazione in sito o separazione off-site), dimostrare che almeno il 75% in peso dei materiali derivanti dalle attività di costruzione e demolizione sia avviato a processi di riciclo o recupero, costituendo un avanzamento rispetto al prerequisito 1 per il quale è sufficiente raggiungere una soglia del 30%. Tale soglia è stabilita dalla seguente tabella riportata nel manuale della GBC HB 2016:

RIDUZIONE PERCENTUALE	PUNTI ASSEGNATI
75%	1
95%	2

Figura 33 - Tabella con percentuali minime da riciclare riportate nel manuale GBC HB

3.2.1.2. Integrazione della piattaforma BimPool-AI nell'esecuzione delle analisi

Per avviare l'analisi finalizzata al calcolo della percentuale di rifiuti riciclati è stato prima necessario verificare se nel modello BIM fosse presente un parametro che indicasse il codice CER⁸ del rifiuto, indispensabile per la successiva identificazione dei materiali demoliti all'interno della piattaforma BimPool-AI. Siccome tale parametro non era stato definito in fase di modellazione, si è proceduto alla creazione di un nuovo parametro condiviso, attribuendo agli elementi della categoria *Pavimento* demoliti nella fase "Stato di progetto" (par. 3.2.2.2.) il codice CER 170107 (Miscugli o scorie di cemento, mattoni, mattonelle e ceramiche, diverse da quelle di cui alla voce 17 01 06).

⁸ Il CER (Codice Europeo Rifiuti) è un codice contenuto nell'EER (Elenco Europeo Rifiuti) costituito da una sequenza numerica composta da tre coppie di cifre che definisce ogni singolo rifiuto. La prima coppia indica la fonte che ha originato il rifiuto, la seconda coppia identifica il processo che ha originato il rifiuto, la terza coppia individua la singola tipologia di rifiuto.

La scelta di associare il codice a livello di *istanza* (e non di *tipo*) si è rivelata fondamentale: un parametro per tipo avrebbe infatti assegnato automaticamente lo stesso codice a tutti gli elementi appartenenti alla medesima tipologia, non facendo distinzione tra componenti da demolire e non da demolire.

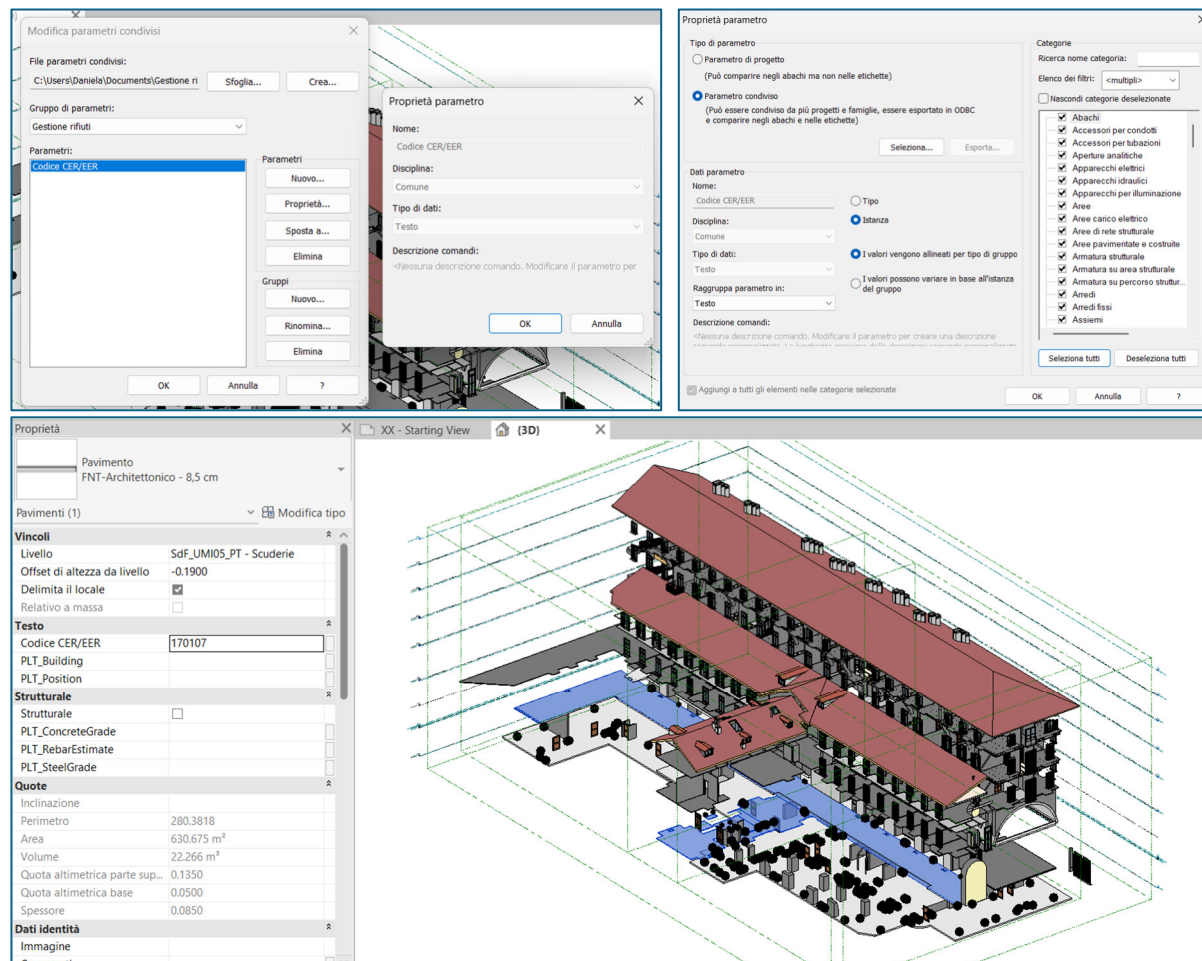


Figura 34 - Definizione del parametro "Codice CER" su Revit

Una volta completata l'assegnazione manuale dei codici a ciascuna istanza, il modello aggiornato è stato caricato su BimPool per avviare l'analisi. Per eseguire le simulazioni ed identificare una procedura efficace sono state considerate, a titolo di test, solamente tre istanze di pavimento.

A seguito del processo di embedding è stato possibile avviare l'analisi attraverso il tool di intelligenza artificiale, scegliendo come agente di ricerca lo *Smart explorer for Models* e selezionando, tra i modelli caricati sulla piattaforma, quello pertinente per eseguire le analisi, ossia il modello CAVA_3_ARC_05_M3001, corrispondente alla rappresentazione dello stato di fatto.

Per procedere con la verifica del credito è necessario avere i dati relativi al volume degli elementi demoliti ed il codice CER dei singoli elementi. Interrogando il modello tramite l'agente di intelligenza artificiale è stato possibile ottenere in pochi secondi le informazioni richieste, riducendo significativamente i tempi normalmente necessari per l'elaborazione manuale dei dati. Di seguito si riporta uno stralcio di conversazione con l'agente di intelligenza artificiale in cui si richiede in primo luogo di individuare il volume degli elementi demoliti con assegnato il codice CER di interesse e, successivamente, di calcolare il volume complessivo.

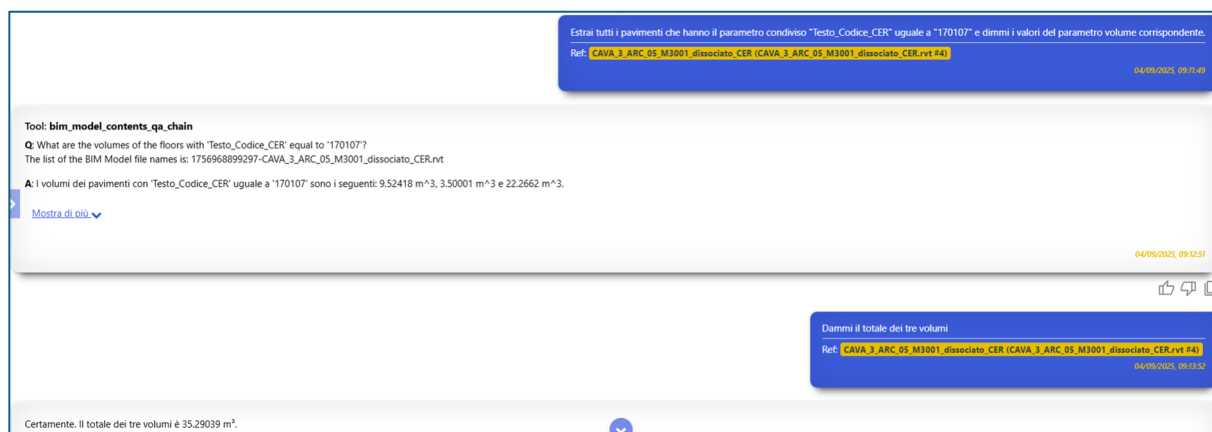


Figura 35-Esempio di conversazione BimPool per l'estrazione degli elementi con assegnato un codice CER

Per validare la correttezza del risultato ottenuto è stata condotta una verifica su Revit mediante la creazione di un abaco dei pavimenti filtrato per i seguenti campi: Famiglia e Tipo, Fase di creazione, Fase di demolizione, Codice CER e Volume. Sono, quindi, stati selezionati quegli elementi che avessero fase di creazione pari a “Stato di fatto”, fase di demolizione “Stato di progetto” e codice CER assegnato pari a 170107.

Filtra per:	Fase di creazione	uguale	Stato di Fatto
E:	Fase di demolizione	uguale	Stato di Progetto
E:	Codice_CER	uguale	170107

Figura 36 - Definizione dei filtri su Revit

I risultati ottenuti hanno evidenziato una sostanziale coerenza tra le informazioni restituite dall'agente di intelligenza artificiale e quelle contenute nel modello BIM, mostrando l'affidabilità dello strumento nell'estrazione e nell'elaborazione dei risultati. L'impiego della piattaforma BimPool per le attività descritte si configura come un processo più immediato ed

intuitivo rispetto alla creazione di abachi su software specialisti come Revit che risultano meno accessibili e difficilmente interrogabili senza avere un'adeguata formazione tecnica.

<Abaco dei pavimenti - CER>				
A	B	C	D	E
Famiglia e tipo	Fase di creazione	Fase di demolizione	Codice_CER	Volume
Pavimento: FNT-Architettonico - 8,5 cm	Stato di Fatto	Stato di Progetto	170107	9.52 m³
Pavimento: FNT-Architettonico - 8,5 cm	Stato di Fatto	Stato di Progetto	170107	3.50 m³
Pavimento: FNT-Architettonico - 8,5 cm	Stato di Fatto	Stato di Progetto	170107	22.27 m³
Totale generale: 3				35.29 m³

Figura 37 - Risultati ottenuti dall'abaco di Revit

Per completare la verifica occorre ancora individuare i volumi da demolire secondo il progetto in modo da poterli confrontare con i volumi che vengono effettivamente prelevati e smaltiti dalle ditte. A tal fine, risulta imprescindibile adottare un sistema di tracciabilità dei rifiuti adeguato ed efficace. Con l'obiettivo di ottimizzare e digitalizzare il monitoraggio delle fasi di gestione dei rifiuti, nel mese di giugno 2024, attraverso il DM 127/2024, è stato introdotto il RENTRI (Registro Nazionale per la Tracciabilità dei Rifiuti), che consente di digitalizzare i documenti obbligatori, tra cui i FIR (Formulario di Identificazione dei Rifiuti) ed i registri di carico e scarico previsti dal D.Lgs. 152/2006 – Testo Unico Ambientale. Grazie alla disponibilità dei FIR in formato digitale è possibile caricarli direttamente su BimPool ed ottenere automaticamente la quantità totale di rifiuti con codice 170107 prelevati dall'impresa. È tuttavia opportuno sottolineare che, essendo il decreto di recente attuazione, parte della documentazione caricata risultava ancora redatta manualmente, incrementando il livello di difficoltà interpretativa da parte dell'agente di intelligenza artificiale. Nonostante tale criticità, l'AI è riuscita ad individuare correttamente tutte le quantità ad eccezione di un caso in cui un valore numerico scarsamente leggibile ha richiesto una seconda interrogazione per fornire il risultato corretto. Tale limite potrà essere agevolmente superato con la progressiva digitalizzazione dei documenti.

Ciao

Sono il tuo assistente Smart Documents Explorer. Posso aiutarti nella ricerca anche semantica dei documenti attraverso metadati, sintesi e contenuti. Posso aiutarti a trovare e analizzare i documenti, estrarre le informazioni chiave, fornire riassunti dettagliati analizzare e correlare globalmente uno o più documenti

Ecco alcuni esempi di domande che puoi farmi:

- Recupera il documento dell'autorizzazione paesaggistica
- Qual è la durata dell'autorizzazione paesaggistica?
- Recupera il documento con le specifiche tecniche dei ventilconvettori
- Qual è la resa riscaldamento per il ventilconvettore VFL06?

Per i documenti selezionati crea una tabella excel in cui per ciascun documento indichi il nome di ciascun documento, la denominazione del destinatario, il codice CER o EER, il codice di destinazione e la quantità

Ref: TXQXC003642BK.PDF TXQXC003731ZS.PDF TXQXC003812CH.PDF 3 files

Certamente. Ho estratto le informazioni richieste dai documenti selezionati e ho creato un file Excel.

Puoi scaricare la tabella dal seguente link: [dati_documenti.xlsx](#)

► Vedi i dettagli di utilizzo dei tools

Figura 38 - Esempio di conversazione su BimPool-AI in cui viene richiesto di creare una tabella Excel riportante i dati contenuti nei FIR

Il tool AI è stato in grado di generare un file Excel contenente i dati estratti dai FIR, organizzati in tabelle di facile consultazione.

Tabella 3 – Dati FIR estratti con BimPool-AI

Nome Documento	Denominazione del Destinatario	Codice CER o EER	Codice di Destinazione	Quantità
1756795468225-TXQXC003642BK.PDF	I.CO.S. ECOLOGIA S.R.L.	170107	R 12 D	15.500 kg
1758202066917-TXQXC003731ZS.PDF	I.CO.S. ECOLOGIA S.R.L.	170107	R 12 D	14.660 kg
1758202117864-TXQXC003812CH.PDF	I.CO.S. ECOLOGIA S.R.L.	170107	R 12 D	15.840 kg
1758202215254-TXQXC003752QG.PDF	I.CO.S. ECOLOGIA S.R.L.	170107	R 12 D	16.840 kg
1758203575629-20250612102045023.pdf	WOOD RECYCLING S.R.L.	170201	R 13 D	3430 kg
1758203605564-20250612102117928.pdf	ALMA SOL	170201	R 13 D	4540 kg

Dal file Excel è stato possibile calcolare il peso complessivo dei materiali smaltiti considerando anche le destinazioni finali.

Siccome il modello Revit, per come era stata effettuata la modellazione, non riportava dati relativi al peso degli elementi ma solamente i volumi, è stato necessario procedere ad una conversione mediante l'applicazione di un coefficiente di densità pari a 1600 kg/m³: un valore di densità intermedio tra quello di miscugli cementizi pesanti e leggeri. Nel caso analizzato, i volumi pari a 35,29 m³ corrispondono quindi a un peso complessivo di circa 56.464 kg.

Applicando la procedura all'intero insieme degli elementi del modello, risulta possibile confrontare il peso totale dei materiali demoliti (con relativo codice CER) con i quantitativi effettivamente smaltiti e/o recuperati dalle imprese autorizzate. Ne deriva in modo immediato la percentuale di rifiuti riciclati rispetto al demolito, parametro chiave ai fini dell'ottenimento del Credito 2 – Materiali e Risorse del protocollo GBC HB.

L'automazione del processo attraverso BimPool-AI consente di ridurre notevolmente il carico di lavoro manuale, i tempi di analisi ed il margine di errore. Il workflow sviluppato (assegnazione parametri → embedding del modello → interrogazione AI → caricamento FIR digitali → confronti quantitativi) costituisce una metodologia replicabile in altri cantieri complessi e in altre tipologie di analisi con richieste simili, costituendo un esempio concreto di come l'integrazione tra BIM e intelligenza artificiale possa supportare la gestione dei processi edilizi.

3.2.2. Riutilizzo degli edifici – MR Prerequisito 3

Un ulteriore prerequisito che l'impresa Secap S.p.A. deve perseguire in fase di costruzione riguarda il riutilizzo degli edifici esistenti. L'obiettivo è quello di estendere il ciclo di vita del patrimonio edilizio esistente e preservare la "materia storica" valorizzando l'edificio esistente all'interno del nuovo progetto di rigenerazione. A tal fine, è richiesto di mantenere gli elementi principali della struttura portante dell'edificio esistente (inclusi i solai portanti), dell'involucro edilizio e delle partizioni interne. In particolare, il manuale GBC HB 2016 fa riferimento alle classi di unità tecnologiche riportate dalla norma UNI 8290:1981 - *Edilizia residenziale. Sistema tecnologico. Classificazione e terminologia* che costituisce la base metodologica per il calcolo delle superfici da conservare. Il manuale richiede il rispetto delle seguenti condizioni quantitative:

- Controllo delle superfici pre-industriali mantenute:

$$\frac{\text{superfici pre – industriali mantenute [m}^2\text{]}}{\text{superfici pre – industriali preesistenti [m}^2\text{]}} \geq 75\%$$

- Controllo delle quantità di progetto rispetto alle quantità pre-industriali:

$$\frac{\text{superfici pre – industriali mantenute [m}^2\text{]}}{\text{superfici complessive di progetto [m}^2\text{]}} \geq 35\%$$

- Controllo delle quantità mantenute sia di carattere pre-industriale sia industrializzate:

$$\frac{\text{superfici complessive mantenute (preindustriali e industrializzate) [m}^2\text{]}}{\text{superfici complessive pre – esistenti (preindustriali e industrializzate) [m}^2\text{]}} \geq 55\%$$

In particolare, per superfici preesistenti si intendono le superfici reali rilevate in m² e calcolate per ciascuna unità tecnologica, distinte in parti con valenza di tipo testimoniale/preindustriale oppure in parti industrializzate. Le superfici mantenute corrispondono, invece, alle porzioni effettivamente conservate nel progetto, mentre le superfici complessive di progetto sono le superfici preesistenti (storico e non storico) conservate, sommate alle superfici realizzate *ex-novo*.

Il procedimento seguito per effettuare la verifica del prerequisito si articola nelle seguenti fasi:

- individuare e quantificare gli elementi con valenza di tipo testimoniale (preindustriali), relativi alla struttura portante dell'edificio esistente (inclusi i solai portanti), all'involucro edilizio ed alle partizioni interne.

- individuare e quantificare gli elementi di nuova realizzazione relativi alla struttura portante (inclusi i solai portanti), all'involucro edilizio e alle partizioni interne, ad esclusione delle superfetazioni a carattere funzionale, degli impianti di fornitura servizi e degli infissi interni ed esterni, realizzati ex-novo.
- individuare e quantificare gli elementi esistenti privi di valenza testimoniale (industrializzati), relativi alla struttura portante dell'edificio esistente (inclusi i solai portanti), all'involucro edilizio e alle partizioni interne, ad esclusione delle superfetazioni a carattere funzionale, degli impianti di fornitura servizi e degli infissi interni ed esterni contenuti nell'edificio.
- verificare che gli indici quantitativi percentuali richiesti dal Manuale GBC HB siano sufficienti per il soddisfacimento del prerequisito.

In particolare, nel calcolo delle superfici, è stata considerata l'area della superficie esterna lorda "vuoto per pieno" per le chiusure verticali; la superficie lorda nel caso dei solai; considerando la superficie di una faccia della partizione utilizzando l'altezza interna di intradosso e sottraendo l'area di porte e finestre interne nel caso di partizioni interne.

Il prerequisito appena descritto ha un ruolo cruciale nel caso del cantiere della Cavallerizza Reale, ed in particolare per l'Ala del Mosca, essendo quest'ultima un edificio storico vincolato, dove la conservazione della materia originaria è centrale. Anche in questo caso, inoltre, come per il credito analizzato in precedenza, l'analisi richiede la raccolta di una grande quantità di informazioni geometriche e documentali, dati potenzialmente verificabili tramite piattaforme come BimPool.

3.2.2.1. Riutilizzo degli edifici - MR Credito 1

Il credito 1 della categoria Materiali e Risorse è direttamente collegato al prerequisito 3 relativo al riutilizzo degli edifici esistenti, introducendo requisiti più restrittivi volti a garantire una maggiore conservazione della materia storica.

Nel caso delle strutture portanti, delle chiusure e delle partizioni interne, per quanto riguarda il Controllo delle quantità mantenute di carattere preindustriale deve essere rispettata la seguente equazione:

$$\frac{\text{superfici pre – industriali mantenute [m}^2\text{]}}{\text{superfici pre – industriali preesistenti [m}^2\text{]}} \geq 85\%$$

Nel caso del controllo delle quantità mantenute sia di carattere preindustriale, sia industrializzate:

$$\frac{\text{superfici compressive mantenute (pre – industriali e industrializzate) [m}^2\text{]}}{\text{superfici compressive preesistenti (pre – industriali e industrializzate) [m}^2\text{]}} \geq 65\%$$

In aggiunta al prerequisito 3, il credito amplia il campo di analisi includendo anche gli elementi di finitura interni esistenti, sia verticali che orizzontali. Per il controllo delle quantità delle superfici di finitura interna mantenute di carattere preindustriale bisogna verificare che vengano rispettate le seguenti percentuali:

$$\frac{\text{superfici pre – industriali mantenute [m}^2\text{]}}{\text{superfici pre – industriali preesistenti [m}^2\text{]}} \geq 75\%$$

Nel caso del controllo delle quantità delle superfici di finitura interna mantenute sia preindustriali, sia industrializzate:

$$\frac{\text{superfici compressive mantenute (pre – industriali e industrializzate) [m}^2\text{]}}{\text{superfici compressive preesistenti (pre – industriali e industrializzate) [m}^2\text{]}} \geq 35\%$$

3.2.2.2. Le Fasi ed i Filtri per una gestione del modello efficiente

Per poter sfruttare al meglio il potenziale offerto dal modello BIM integrato con l'intelligenza artificiale, è necessario adottare una strategia di modellazione efficace per estrarre i dati in maniera strutturata e coerente. Nel caso specifico della verifica dei requisiti richiesti dai crediti del protocollo GBC HB, si è rivelato particolarmente utile l'impiego delle *Fasi* e dei *Filtri delle fasi* all'interno del software Revit, che permettono di distinguere in modo immediato gli elementi conservati, demoliti e di nuova realizzazione. Nel caso del progetto dell'Ala del Mosca della Cavallerizza Reale di Torino, per la disciplina architettonica, sono state definite quattro fasi di progetto: Stato di fatto, SdF CC2, SdF CC3 e Stato di Progetto. Le fasi SdF CC2 ed SdF CC3 non sono rilevanti per le analisi svolte in quanto appartengono ad una fase conoscitiva del cantiere e del progetto. Ai fini della verifica dei crediti, pertanto, l'attenzione è stata rivolta esclusivamente alle fasi Stato di fatto e Stato di progetto. L'impostazione di una corretta sequenza temporale nel definire le fasi è fondamentale in quanto i filtri si basano sul confronto con la fase immediatamente precedente per determinare lo stato di ciascun elemento. Un'errata configurazione della cronologia comporterebbe la classificazione distorta di elementi creati o demoliti, alterando in modo significativo i risultati delle analisi. Tale aspetto evidenzia l'importanza di una modellazione BIM metodologicamente rigorosa, prerequisito indispensabile affinché l'estrazione automatizzata dei dati possa restituire risultati coerenti.

Fasi

Fasi del progetto Filtri delle fasi di lavoro Sostituzioni grafica

PASSATO	
Nome	Descrizione
1 Stato di Fatto	Condizioni esistenti
2 SdF CC2	Stato di Fatto successivo a Demolizioni Cantiere Conoscenza 2 (ottenimento pareri)
3 SdF CC3	Stato di Fatto successivo a Demolizioni Cantiere Conoscenza 3 e seguenti (demolizioni da non computare)
4 Stato di Progetto	Layout finale incluse demolizioni di progetto
FUTURO	

Inserisci
Inserisci prima
Inserisci dopo

Combina con:
Precedente
Successiva

Figura 39 - Definizione delle Fasi su Revit

Per gestire al meglio le informazioni e per controllare le modalità di visualizzazione degli elementi in funzione del loro stato, sono stati creati i *Filtri delle fasi*. In particolare, gli elementi possono ricadere in uno dei seguenti stati per ciascuna fase:

- Nuovo: elementi creati nella fase corrente rispetto alla fase precedente;
- Esistenti: elementi già presenti nella fase precedente;
- Demolito: elementi che sono stati demoliti nella fase considerata;
- Temporaneo: elementi che vengono creati e demoliti nella fase selezionata.

Ai fini dei calcoli richiesti dai crediti è stato adottato il filtro delle fasi “Comparative”, che evidenzia in maniera selettiva gli elementi “Nuovi” e “Demoliti” nello Stato di Progetto, escludendo dalla selezione quelli “Esistenti” e “Temporanei”.

Fasi

Fasi del progetto Filtri delle fasi di lavoro Sostituzioni grafica

Nome del filtro	Nuovo	Esistente	Demolito	Temporaneo
1 Comparative	Per categoria	Non visualizzato	Per categoria	Non visualizzato
2 Existing	Non visualizzato	Per categoria	Non visualizzato	Non visualizzato
3 Existing + New	Per categoria	Per categoria	Non visualizzato	Non visualizzato
4 Show All	Per categoria	Sostituito	Sostituito	Sostituito
5 Show Demolished	Non visualizzato	Non visualizzato	Per categoria	Non visualizzato
6 Show New	Per categoria	Non visualizzato	Non visualizzato	Non visualizzato

Nuovo Elimina

Figura 40 - Assegnazione dei filtri delle fasi

Per rendere immediatamente leggibile la distinzione, sono state applicate le *Sostituzioni Grafiche* in modo da assegnare il colore giallo per gli elementi demoliti ed il colore rosso per quelli di nuova realizzazione. Questo ha consentito di ottenere la nota visualizzazione “gialli e rossi”, utile non solo per il controllo interno ma anche come strumento di comunicazione con la committenza e gli altri attori di progetto. Dal punto di vista metodologico, un approccio del genere consente di visualizzare in maniera immediata lo stato di conservazione e trasformazione dell’edificio semplificando le analisi relative ai crediti GBC HB e riducendo i margini di errore nelle fasi di valutazione.

Fasi del progetto Filtri delle fasi di lavoro Sostituzioni grafica						
Stato della fase	Proiezione/Superficie		Taglio		Mezzitoni	Materiale
	Linee	Motivi	Linee	Motivi		
Esistente				Nascosto	☐	Phase - Exist
Demolito					☐	Phase - Demo
Nuovo					☐	Phase - New
Temporaneo					☐	Phase - Temporary

Figura 41 – Definizione della sostituzione grafica

Questo ha consentito di ottenere la nota visualizzazione “gialli e rossi”, utile non solo per il controllo interno ma anche come strumento di comunicazione con la committenza e gli altri attori di progetto.

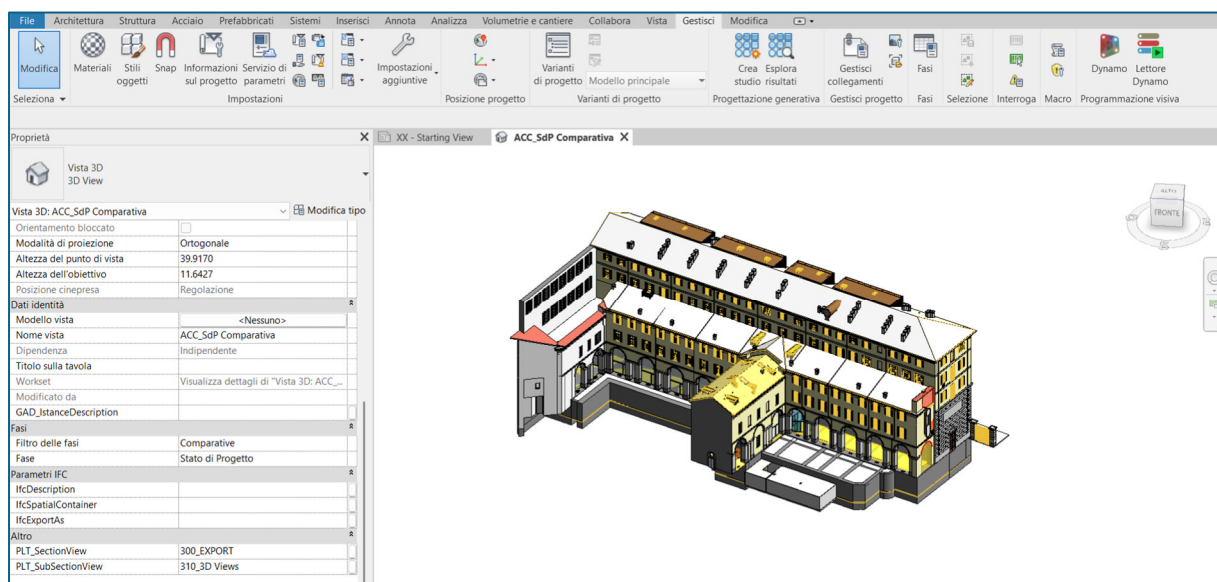


Figura 42 - Creazione di una nuova vista

Per completare la procedura è stata creata una vista dedicata (“Acc_SdP Gialli e Rossi”) e sono state pubblicate le viste selezionate nel cloud tramite la finestra “Impostazioni di pubblicazione” del modulo Collaborate.

Le viste condivise includevano: Stato di progetto, Gialli e Rossi, Comparativa e IFC. In questo modo, una volta caricato il modello sulla piattaforma BimPool, le informazioni risultano immediatamente disponibili e interrogabili anche da parte di altri utenti, garantendo la coerenza tra modello locale e modello condiviso.

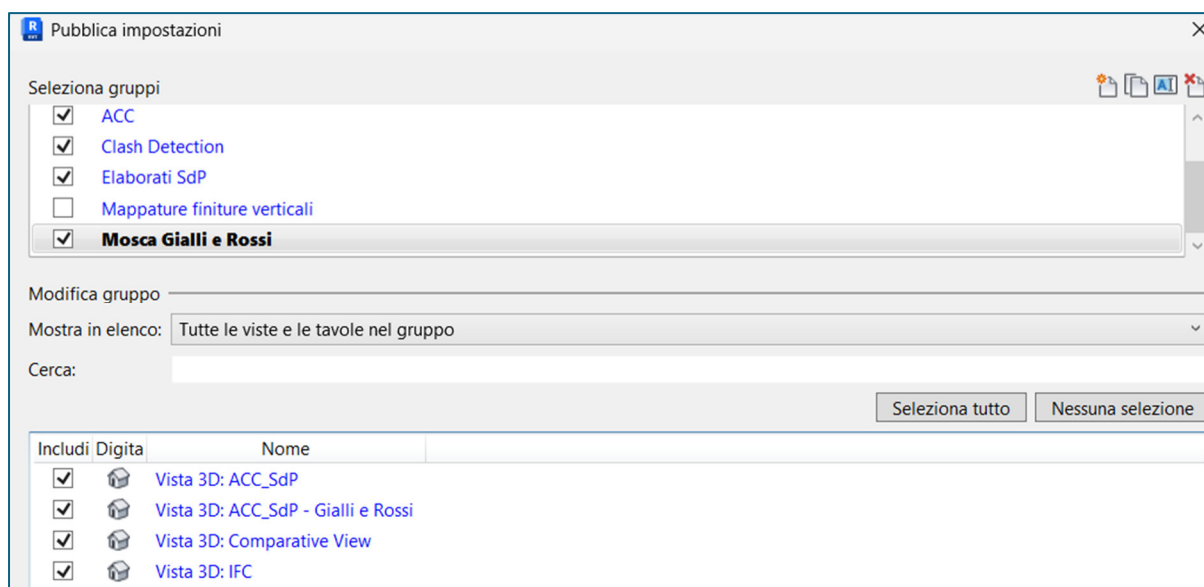


Figura 43 - Creazione di una nuova vista condivisa

Una volta salvata la vista si è proceduto con il caricare il file sul portale prestando attenzione ad indicare anche il modello linkato e a caricare anche quello su BimPool.

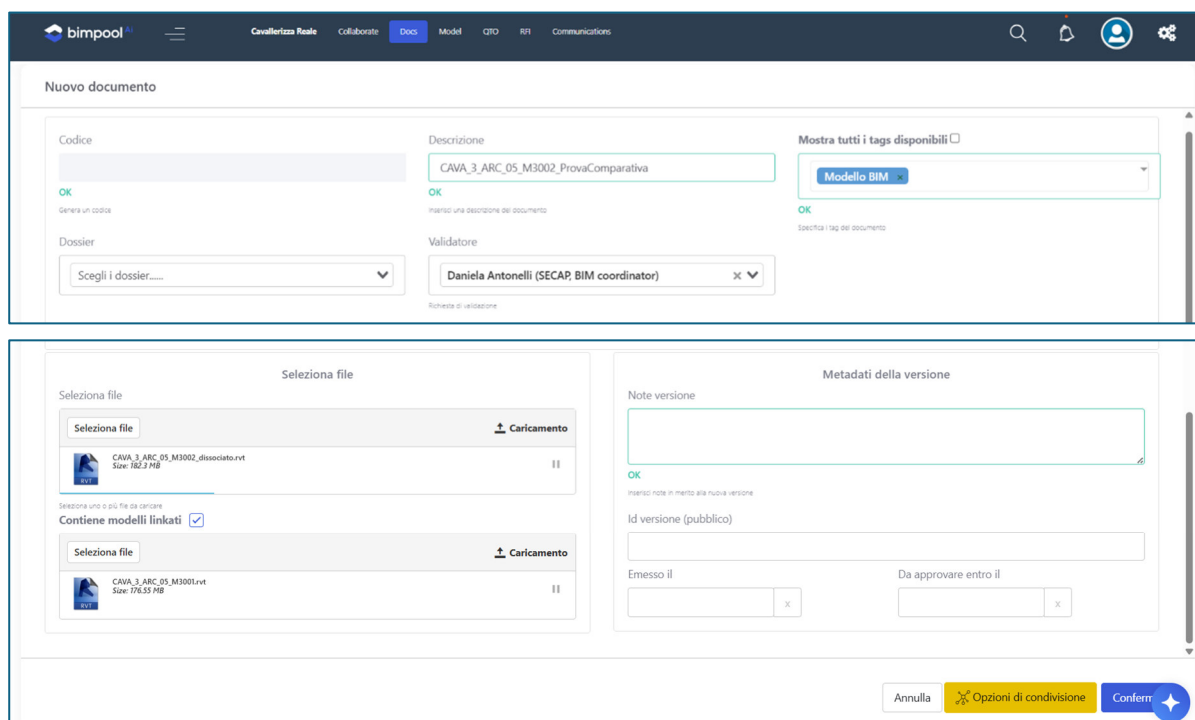


Figura 44 - Caricamento del modello sulla piattaforma BimPool-AI

3.2.2.3. Interrogare l'AI sul modello per il calcolo delle superfici

Dopo aver caricato i modelli su BimPool, è stata avviata una fase di sperimentazione volta a verificare la capacità dell'intelligenza artificiale di restituire risultati attendibili e coerenti con i requisiti previsti dal protocollo GBC HB. Per eseguire un'analisi di questo tipo può essere utile avere un unico modello per ciascuna disciplina organizzato con fasi e filtri delle fasi. Avere più modelli collegati tra di loro comporterebbe un maggiore rischio di errore da parte del software. Per svolgere le simulazioni e definire una metodologia replicabile è stato interrogato il modello M3001, contenente gli elementi presenti nello stato di fatto e gli elementi mantenuti nello stato di progetto, concentrandosi sull'analisi degli elementi *solaio*.

Poiché il fabbricato oggetto di studio è di rilevante interesse storico ed è sottoposta alla tutela da parte della Soprintendenza, si è proceduto con un'analisi preliminare della Carta d'identità dell'edificio⁹ al fine di individuare quali elementi rientrassero nella categoria “pre-industriali” e quali in quella “industrializzati”. Nel caso dei solai si è attestato che essi fossero da considerarsi al 100% come elementi storici, in caso contrario, qualora non fosse stato già presente, sarebbe stato necessario definire in Revit un nuovo parametro specifico per contrassegnare la valenza storica di ciascun componente.

Dopo aver svolto questa verifica è stata interrogata l'AI sul modello M3001 per ottenere il valore delle superfici dei solai presenti nello stato di fatto e, successivamente, la superficie dei solai demoliti nello stato di progetto, così da ricavare la quota di superficie effettivamente mantenuta. Tale valore corrisponde al dato richiesto dall'equazione 2 del prerequisito 3 del protocollo GBC HB.

In questo processo è stato fondamentale l'impiego delle fasi e dei filtri delle fasi descritti nel paragrafo precedente in quanto BimPool è in grado di distinguere gli elementi creati o demoliti nelle diverse fasi progettuali.

Viene di seguito riportato un esempio di conversazione dove si è inizialmente chiesto di individuare le superfici di solaio totali costituenti lo stato di fatto del modello (si tratta quindi degli elementi preindustriali), per poi richiedere la superficie di elementi che vengono demoliti nella fase Stato di progetto rispetto a quelli presenti nella fase “Stato di fatto” e da queste si è ricavata la superficie di solai mantenuta nello stato di progetto rispetto allo stato di fatto.

⁹ La Carta d'identità dell'edificio è un documento che contiene un riassunto di un'analisi quantitativa di tutte le parti storiche costituenti il manufatto, offrendo il quadro storico e generale delle tecnologie e dei sistemi costruttivi.

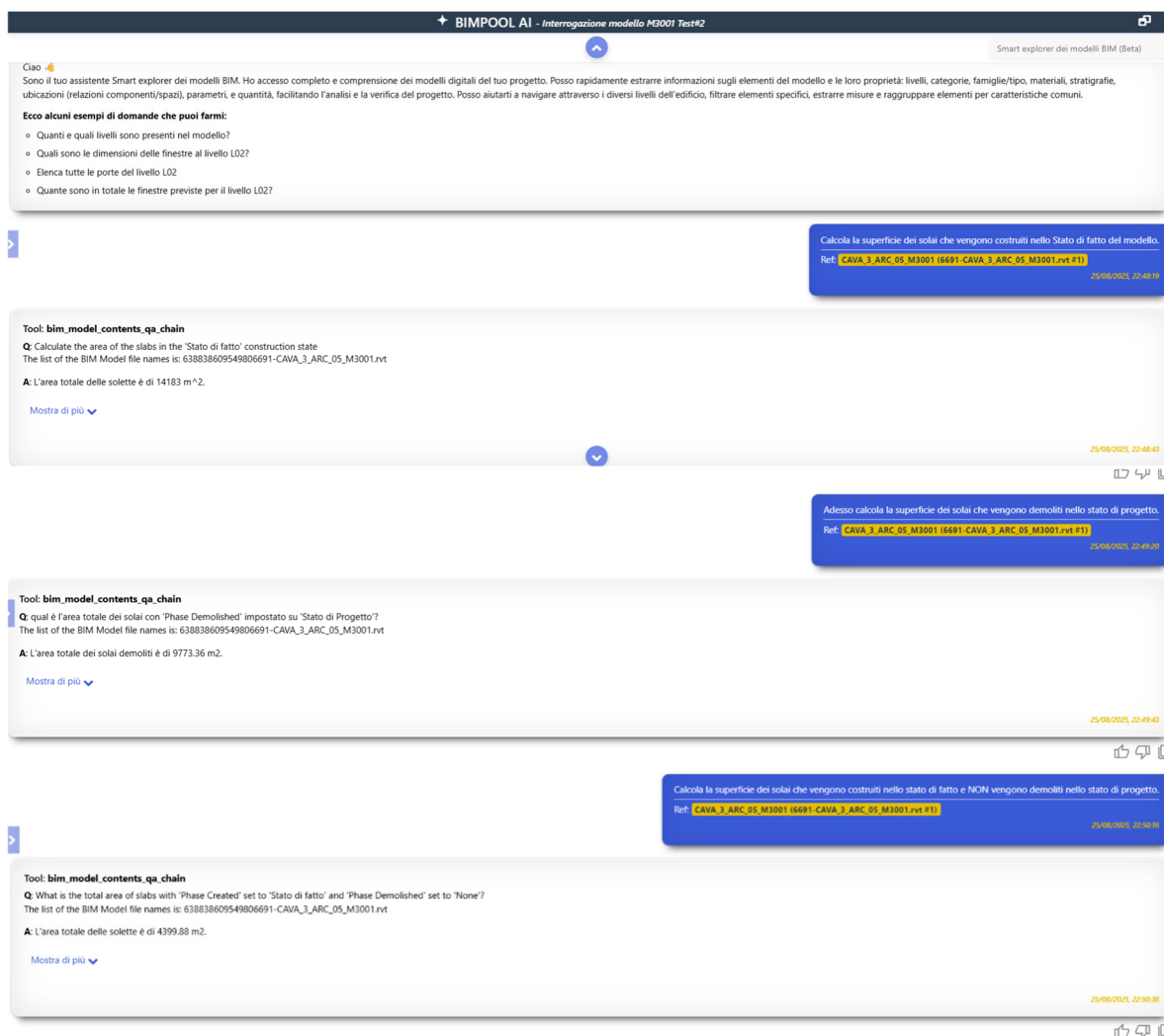


Figura 45- Esempio di conversazione per il calcolo delle superfici mantenute

L'analisi ha mostrato che l'AI è riuscita a restituire in pochi minuti tutte le superfici richieste senza particolari criticità. Affinché ciò sia possibile, tuttavia, è necessario che il modello BIM sia opportunamente predisposto, con parametri coerenti e codici adeguati agli obiettivi di analisi. Tale approccio consente di ridurre in modo significativo i tempi rispetto ad una procedura tradizionale che avrebbe comportato la creazione di un file Excel all'interno del quale si sarebbero inseriti manualmente tutti i dati necessari, aumentando il rischio di errore umano. Per verificare l'affidabilità dei risultati ottenuti, è stato costruito in Revit un abaco delle quantità relativo agli elementi *pavimento*, includendo i campi *fase di creazione*, *fase di demolizione* e *area*. Si è, inoltre, specificato nel campo proprietà di fornire il totale dei valori costituenti la colonna relativa l'Area.

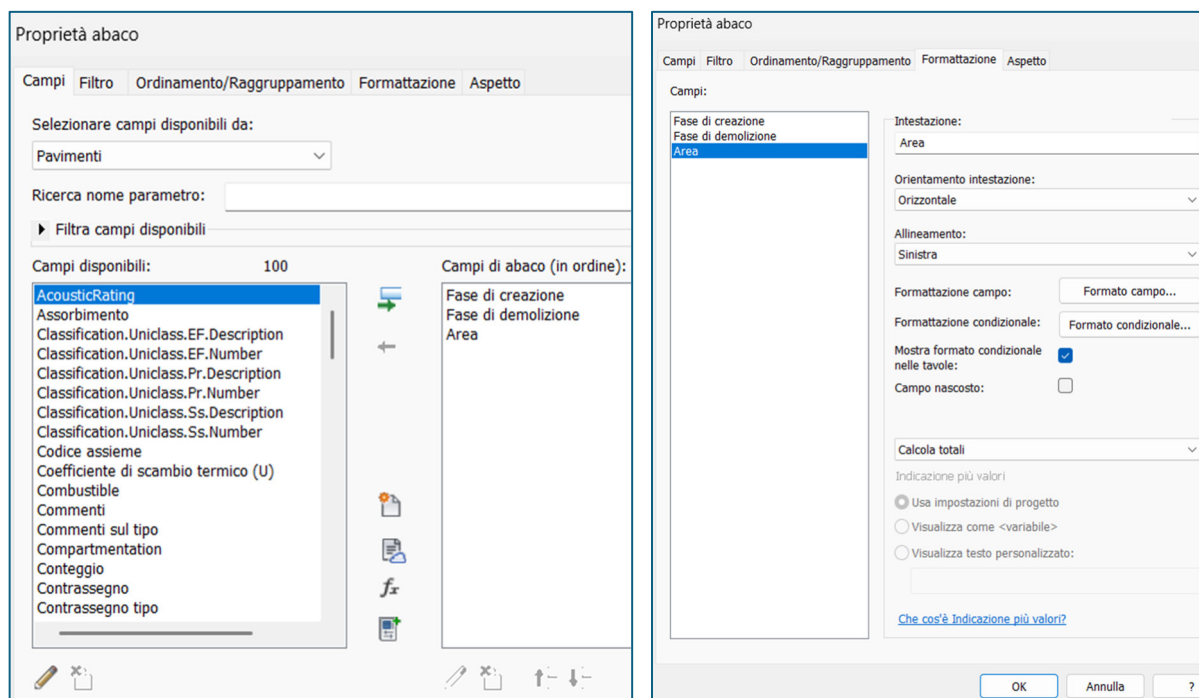


Figura 46 - Creazione abaco delle quantità dei pavimenti

Una volta creato l'abaco, applicando successivamente i filtri, sono state isolate le tre condizioni precedentemente descritte (elementi esistenti, demoliti e mantenuti) in modo da ricadere nelle stesse casistiche richieste all'intelligenza artificiale e poter confrontare i valori calcolati manualmente con quelli automatizzati.

- Elementi esistenti

Campi	Filtro	Ordinamento/Raggruppamento	Formattazione	Aspetto
Filtra per:	Fase di creazione	uguale	Stato di Fatto	

- Elementi demoliti

Campi	Filtro	Ordinamento/Raggruppamento	Formattazione	Aspetto
Filtra per:	Fase di creazione	uguale	Stato di Fatto	
E:	Fase di demolizione	uguale	Stato di Progetto	

- Elementi mantenuti

Campi	Filtro	Ordinamento/Raggruppamento	Formattazione	Aspetto
Filtra per:	Fase di creazione	uguale	Stato di Fatto	
E:	Fase di demolizione	uguale	Nessuno	

- Elementi esistenti

<Abaco dei pavimenti - Elementi mantenuti>			
A	B	C	D
Famiglia e tipo	Fase di creazione	Fase di demolizione	Area
FNT-VOLTA A VELA UNGHIATA: FNT-VOLTA A VELA UNGHIATA	Stato di Fatto	Nessuno	16.29 m ²
Pavimento: FNT-Architettonico - 8,5 cm	Stato di Fatto	Stato di Progetto	4782.30 m ²
Pavimento: FNT-Architettonico - 13,5 cm	Stato di Fatto	Stato di Progetto	12.16 m ²
Pavimento: FNT-Architettonico cementine - 7 cm	Stato di Fatto	Stato di Progetto	273.55 m ²
Pavimento: FNT-architrave camino 10cm	Stato di Fatto	Stato di Progetto	0.37 m ²
Pavimento: FNT-architrave camino 15cm	Stato di Fatto	Stato di Progetto	0.15 m ²
Pavimento: FNT-architrave camino 30cm	Stato di Fatto	Stato di Progetto	0.54 m ²
Pavimento: FNT-assito in legno - 3 cm	Stato di Fatto	<variabile>	17.44 m ²
Pavimento: FNT-Generico - 7 cm	Stato di Fatto	Stato di Progetto	91.31 m ²
Pavimento: FNT-Generico - 8 cm	Stato di Fatto	Nessuno	6.17 m ²
Pavimento: FNT-Generico - 11,5 cm	Stato di Fatto	Stato di Progetto	303.57 m ²
Pavimento: FNT-Generico - 17 cm	Stato di Fatto	Stato di Progetto	2.47 m ²
Pavimento: FNT-Generico - 18 cm	Stato di Fatto	<variabile>	88.41 m ²
Pavimento: FNT-Generico - 20 cm	Stato di Fatto	<variabile>	3087.48 m ²
Pavimento: FNT-Generico - 28 cm	Stato di Fatto	Nessuno	1.06 m ²
Pavimento: FNT-Generico - 38 cm	Stato di Fatto	Stato di Progetto	393.34 m ²
Pavimento: FNT-Generico - 116 cm	Stato di Fatto	Nessuno	5.23 m ²
Pavimento: FNT-Generico - 126 cm	Stato di Fatto	Nessuno	0.00 m ²
Pavimento: FNT-Generico - 132 cm	Stato di Fatto	Nessuno	515.18 m ²
Pavimento: FNT-Generico - 146 cm	Stato di Fatto	Nessuno	46.00 m ²
Pavimento: FNT-Generico - 175 cm	Stato di Fatto	Nessuno	55.96 m ²
Pavimento: FNT-Generico - 190 cm	Stato di Fatto	Nessuno	45.12 m ²
Pavimento: FNT-Generico - 205 cm	Stato di Fatto	Nessuno	64.28 m ²
Pavimento: FNT-Generico - 220 cm	Stato di Fatto	Nessuno	437.15 m ²
Pavimento: FNT-Generico - 230 cm	Stato di Fatto	Nessuno	44.30 m ²
Pavimento: FNT-Generico - 248 cm	Stato di Fatto	Nessuno	530.34 m ²
Pavimento: FNT-Generico - 250 cm	Stato di Fatto	Nessuno	3.61 m ²
Pavimento: FNT-Generico - 510 cm	Stato di Fatto	Nessuno	480.06 m ²
Pavimento: FNT-Generico - 512 cm	Stato di Fatto	Nessuno	169.74 m ²
Pavimento: FNT-Generico VARIABILE - 15cm	Stato di Fatto	Stato di Progetto	10.50 m ²
Pavimento: FNT-Generico VARIABILE - 20cm	Stato di Fatto	Stato di Progetto	3.95 m ²
Pavimento: FNT-Pavimento bagni - 7 cm	Stato di Fatto	Nessuno	1.07 m ²
Pavimento: FNT-Pavimento bagni - 10 cm	Stato di Fatto	Stato di Progetto	6.14 m ²
Pavimento: FNT-Pavimento Bagni - 11 cm	Stato di Fatto	Stato di Progetto	8.20 m ²
Pavimento: FNT-Pavimento bagni - 12 cm	Stato di Fatto	Stato di Progetto	9.74 m ²
Pavimento: FNT-Pavimento bagni - 15 cm	Stato di Fatto	Stato di Progetto	2.02 m ²
Pavimento: FNT-Pavimento Bagni - 21 cm	Stato di Fatto	Stato di Progetto	6.43 m ²
Pavimento: FNT-Pavimento Bagni - 23 cm	Stato di Fatto	Stato di Progetto	8.32 m ²
Pavimento: FNT-Pavimento Bagni - 23.5 cm	Stato di Fatto	Stato di Progetto	5.57 m ²
Pavimento: FNT-Pavimento Bagni - 25 cm	Stato di Fatto	Stato di Progetto	3.41 m ²
Pavimento: FNT-Pavimento Bagni - 38 cm	Stato di Fatto	Stato di Progetto	1.94 m ²
Pavimento: SOL-Solaio in legno - 23,5 cm	Stato di Fatto	Stato di Progetto	24.06 m ²
Pavimento: SOL-Solaio in legno - 30 cm	Stato di Fatto	Stato di Progetto	27.32 m ²
Pavimento: SOL-Solaio in legno - 35 cm	Stato di Fatto	<variabile>	14.26 m ²
Pavimento: SOL-Solaio in legno - tavolato 3,5cm	Stato di Fatto	<variabile>	2592.77 m ²
Totale generale: 197			14199.28 m ²

Figura 47 - Abaco delle pavimentazioni esistenti

- **Elementi demoliti**

<Abaco dei pavimenti - Elementi demoliti>			
A	B	C	D
Famiglia e tipo	Fase di creazione	Fase di demolizione	Area
Pavimento: FNT-Architettonico - 8,5 cm	Stato di Fatto	Stato di Progetto	4782.30 m ²
Pavimento: FNT-Architettonico - 13,5 cm	Stato di Fatto	Stato di Progetto	12.16 m ²
Pavimento: FNT-Architettonico cementine - 7 cm	Stato di Fatto	Stato di Progetto	273.55 m ²
Pavimento: FNT-architrave camino 10cm	Stato di Fatto	Stato di Progetto	0.37 m ²
Pavimento: FNT-architrave camino 15cm	Stato di Fatto	Stato di Progetto	0.15 m ²
Pavimento: FNT-architrave camino 30cm	Stato di Fatto	Stato di Progetto	0.54 m ²
Pavimento: FNT-assito in legno - 3 cm	Stato di Fatto	Stato di Progetto	7.69 m ²
Pavimento: FNT-Generico - 7 cm	Stato di Fatto	Stato di Progetto	91.31 m ²
Pavimento: FNT-Generico - 11,5 cm	Stato di Fatto	Stato di Progetto	303.57 m ²
Pavimento: FNT-Generico - 17 cm	Stato di Fatto	Stato di Progetto	2.47 m ²
Pavimento: FNT-Generico - 18 cm	Stato di Fatto	Stato di Progetto	68.56 m ²
Pavimento: FNT-Generico - 20 cm	Stato di Fatto	Stato di Progetto	2600.64 m ²
Pavimento: FNT-Generico - 38 cm	Stato di Fatto	Stato di Progetto	393.34 m ²
Pavimento: FNT-Generico VARIABILE - 15cm	Stato di Fatto	Stato di Progetto	10.50 m ²
Pavimento: FNT-Generico VARIABILE - 20cm	Stato di Fatto	Stato di Progetto	3.95 m ²
Pavimento: FNT-Pavimento bagni - 10 cm	Stato di Fatto	Stato di Progetto	6.14 m ²
Pavimento: FNT-Pavimento Bagni - 11 cm	Stato di Fatto	Stato di Progetto	8.20 m ²
Pavimento: FNT-Pavimento bagni - 12 cm	Stato di Fatto	Stato di Progetto	9.74 m ²
Pavimento: FNT-Pavimento bagni - 15 cm	Stato di Fatto	Stato di Progetto	2.02 m ²
Pavimento: FNT-Pavimento Bagni - 21 cm	Stato di Fatto	Stato di Progetto	6.43 m ²
Pavimento: FNT-Pavimento Bagni - 23 cm	Stato di Fatto	Stato di Progetto	8.32 m ²
Pavimento: FNT-Pavimento Bagni - 23.5 cm	Stato di Fatto	Stato di Progetto	5.57 m ²
Pavimento: FNT-Pavimento Bagni - 25 cm	Stato di Fatto	Stato di Progetto	3.41 m ²
Pavimento: FNT-Pavimento Bagni - 38 cm	Stato di Fatto	Stato di Progetto	1.94 m ²
Pavimento: SOL-Solaio in legno - 23,5 cm	Stato di Fatto	Stato di Progetto	24.06 m ²
Pavimento: SOL-Solaio in legno - 30 cm	Stato di Fatto	Stato di Progetto	27.32 m ²
Pavimento: SOL-Solaio in legno - 35 cm	Stato di Fatto	Stato di Progetto	5.06 m ²
Pavimento: SOL-Solaio in legno - tavolato 3,5cm	Stato di Fatto	Stato di Progetto	1114.05 m ²
Totale generale: 124			9773.36 m ²

Figura 48 - Abaco delle pavimentazioni demolite

- **Elementi mantenuti**

<Abaco dei pavimenti - Elementi mantenuti>			
A	B	C	D
Famiglia e tipo	Fase di creazione	Fase di demolizione	Area
FNT-VOLTA A VELA UNGHIATA: FNT-VOLTA A VELA UNGHIATA	Stato di Fatto	Nessuno	16.29 m ²
Pavimento: FNT-Generico - 8 cm	Stato di Fatto	Nessuno	6.17 m ²
Pavimento: FNT-Generico - 18 cm	Stato di Fatto	Nessuno	19.85 m ²
Pavimento: FNT-Generico - 20 cm	Stato di Fatto	Nessuno	486.83 m ²
Pavimento: FNT-Generico - 28 cm	Stato di Fatto	Nessuno	1.06 m ²
Pavimento: FNT-Generico - 116 cm	Stato di Fatto	Nessuno	5.23 m ²
Pavimento: FNT-Generico - 126 cm	Stato di Fatto	Nessuno	0.00 m ²
Pavimento: FNT-Generico - 132 cm	Stato di Fatto	Nessuno	515.18 m ²
Pavimento: FNT-Generico - 146 cm	Stato di Fatto	Nessuno	46.00 m ²
Pavimento: FNT-Generico - 175 cm	Stato di Fatto	Nessuno	55.96 m ²
Pavimento: FNT-Generico - 190 cm	Stato di Fatto	Nessuno	45.12 m ²
Pavimento: FNT-Generico - 205 cm	Stato di Fatto	Nessuno	64.28 m ²
Pavimento: FNT-Generico - 220 cm	Stato di Fatto	Nessuno	437.15 m ²
Pavimento: FNT-Generico - 230 cm	Stato di Fatto	Nessuno	44.30 m ²
Pavimento: FNT-Generico - 248 cm	Stato di Fatto	Nessuno	530.34 m ²
Pavimento: FNT-Generico - 250 cm	Stato di Fatto	Nessuno	3.61 m ²
Pavimento: FNT-Generico - 510 cm	Stato di Fatto	Nessuno	480.06 m ²
Pavimento: FNT-Generico - 512 cm	Stato di Fatto	Nessuno	169.74 m ²
Pavimento: FNT-Pavimento bagni - 7 cm	Stato di Fatto	Nessuno	1.07 m ²
Pavimento: SOL-Solaio in legno - 35 cm	Stato di Fatto	Nessuno	9.20 m ²
Pavimento: SOL-Solaio in legno - tavolato 3,5cm	Stato di Fatto	Nessuno	1478.71 m ²
Totale generale: 72			4416.17 m ²

Figura 49 – Abaco delle pavimentazioni mantenute

Il confronto tra i risultati ottenuti attraverso le due modalità ha evidenziato una discrepanza di 16 m² nel calcolo delle superfici degli elementi mantenuti, pari a circa un errore dello 0,11%. L'elemento non riconosciuto, identificato come FNT – VOLTA A VELA UNGHIATA, è risultato la causa della differenza. Tale margine di errore, pur contenuto, dimostra la necessità di ulteriori perfezionamenti della piattaforma, ma conferma allo stesso tempo l'elevata affidabilità del sistema.

Successivamente si è richiesto a BimPool-AI di visualizzare gli elementi mantenuti nel modello.

Estrai gli elementi pavimento che vengono costruiti nello stato di fatto e NON vengono demoliti nello stato di progetto.
 Ref: CAVA_3_ARC_05_M3001 (6691-CAVA_3_ARC_05_M3001.rvt #1)

Certamente. Ho estratto 73 elementi di tipo "Floor" (pavimento) che sono stati creati nella fase "Stato di Fatto" e non hanno una fase di demolizione specificata.

Ho preparato un file Excel con l'elenco completo. Puoi scaricarlo qui: [elementi_pavimento_stato_di_fatto.xlsx](#).

► Vedi i dettagli di utilizzo dei tools

Mostra di meno

Ragionamento

La richiesta dell'utente per elementi "pavimento" viene interpretata come "Floors" in Revit. Di conseguenza, vengono identificati i tipi di elementi rilevanti: "Floors", "Floor_Subcomponent" e "Pavimenti". Successivamente, viene eseguita una query sul modello BIM - #modelId:63883609549806691-CAVA_3_ARC_05_M3001.rvt# del progetto Cavalierizza Reale per trovare tutti i componenti di tipo "Floors" (pavimenti). I risultati sono filtrati per includere solo i pavimenti creati nella fase "Stato di Fatto" e non demoliti nella fase "Stato di Progetto", restituendo l'ID, la descrizione, la fase di creazione e la fase di demolizione di ciascun pavimento corrispondente.

*Attenzione: La tabella mostra al massimo 500 righe, scarica per avere la lista completa

#	Nome Componente	Descrizione Componente	Fase di Creazione	Fase di Demolizione
66	8555_27904	Floor [2203581]	Stato di Fatto	None
67	8577_27904	Floor [2203641]	Stato di Fatto	None
68	8730_27904	Floor [2442760]	Stato di Fatto	None
69	9649_27904	Floor [2691511]	Stato di Fatto	None
70	9658_27904	Floor [2692007]	Stato di Fatto	None
71	9671_27904	Floor [2692205]	Stato di Fatto	None
72	9678_27904	Floor [2692577]	Stato di Fatto	None
73	9690_27904	Floor [2692751]	Stato di Fatto	None

Mostra nel visualizzatore ■ ■ ■ Applica Colore Scarica tutti Analisi dati

Figura 50 - Esempio di conversazione con richiesta di visualizzazione delle pavimentazioni mantenute

La simulazione ha evidenziato la rilevanza della formulazione delle richieste in linguaggio naturale. In un primo tentativo, infatti, l'AI non ha interpretato correttamente la richiesta di “mostrare nel visualizzatore gli elementi mantenuti” poiché il termine “visualizzatore” non era stato compreso dal Bot. Modificando la domanda e chiedendo di “estrarre gli elementi”, la piattaforma è stata, invece, in grado di restituire correttamente le informazioni. Questo aspetto sottolinea l'importanza di una semantica controllata nell'interazione uomo-macchina.

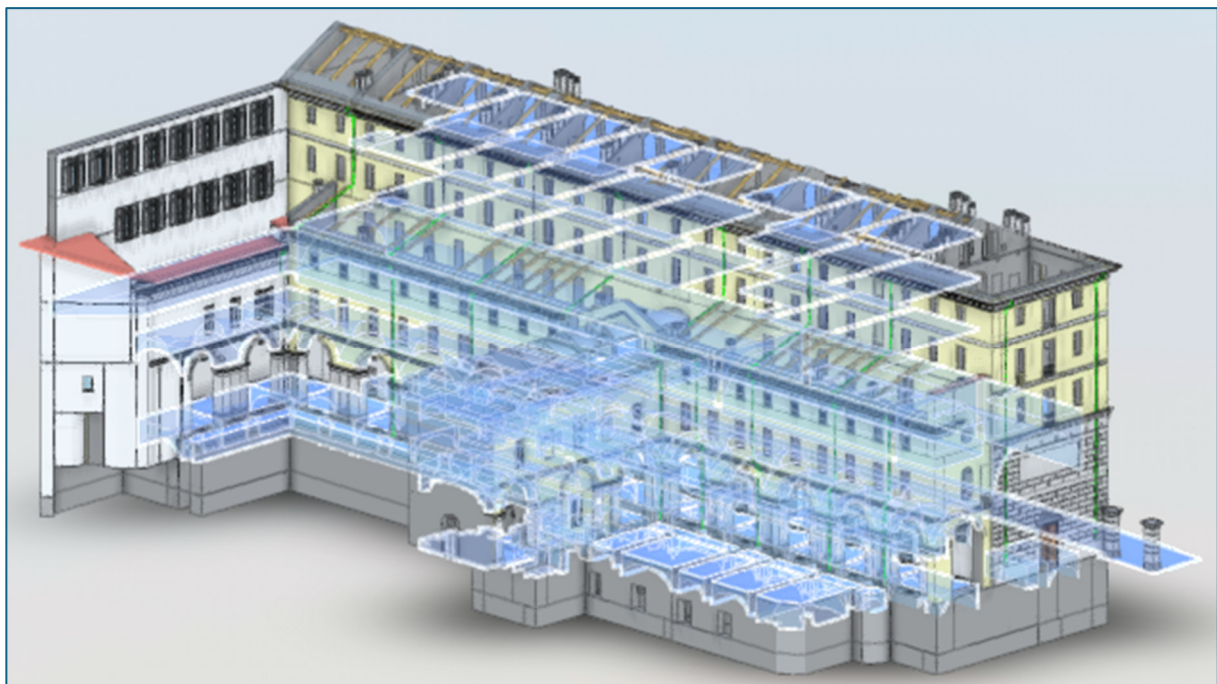


Figura 51 - Visualizzazione delle pavimentazioni mantenute su Bimpool-AI

Complessivamente i risultati ottenuti dimostrano il potenziale di strumenti di questo tipo per eseguire in modo rapido i calcoli richiesti dal protocollo GBC HB, in particolare per la verifica del credito 2 – Materiali e Risorse.

Il calcolo della superficie di solai mantenuti rispetto alle superfici preesistenti ottenuto con il rapporto

$$\frac{\text{superfici complessive mantenute (pre – industriali e industrializzate) [m}^2\text{]}}{\text{superfici complessive preesistenti (pre – industriali e industrializzate) [m}^2\text{]}} = \frac{4416}{14199} = 31\%$$

rappresenta un esempio concreto di come l’AI possa supportare la valutazione dei crediti, riducendo i tempi di elaborazione e migliorando la tracciabilità dei dati.

3.2.3. Ottimizzazione ambientale dei prodotti

Un ulteriore credito che Secap S.p.A. si propone di perseguire per l’Ala del Mosca del cantiere inerente alla Cavallerizza Reale riguarda il credito 4 “Ottimizzazione ambientale dei prodotti”. L’obiettivo è quello di incentivare l’impiego di prodotti e materiali per i quali siano disponibili informazioni trasparenti e per i quali siano verificati l’impatto ambientale, economico e sociale. In base agli accorgimenti presi ed al numero di prodotti certificati, con questo credito si possono conseguire da 1 a 5 punti; nel caso in esame l’impresa si è prefissata di ottenerne 2.

Per ottenere i crediti si possono seguire due approcci che possono essere combinati o perseguiti in maniera individuale:

- Certificazioni di terza parte e impatti ambientali (2 punti): Questo prevede che si abbiano certificazioni di terza parte, *Environmental Product Declaration* (EPD), per almeno 5 differenti prodotti installati permanentemente nel progetto di almeno 3 differenti produttori, oppure che si abbiano i certificati Life Cycle Assessment (LCA) di prodotto (report pubblico), per almeno 10 differenti prodotti installati permanentemente nel progetto di almeno 3 differenti produttori, in cui vengano dichiarati i principali indicatori di impatto ambientale, elencati nella lista di seguito: *Global Warming Potential* (GWP); riduzione dello strato di ozono; acidificazione; eutrofizzazione; formazione di ossidanti fotochimici; consumo di risorse con contenuto energetico non rinnovabile.
- Certificazione multicriterio (1-3 punti): Prevede che vengano utilizzati prodotti che rispondano ad uno o più dei criteri di estrazione responsabile scelti tra i seguenti:

responsabilità prolungata del produttore; materiali rapidamente rinnovabili (*bio-based materials*); prodotti di legno certificati secondo il *Forest Stewardship Council* (FSC) o il *Programme for Endorsement of Forest Certification schemes* (PEFC); contenuto di riciclato del prodotto secondo la UNI EN ISO 14021 (come somma del contenuto di riciclato post-consumo più la metà del contenuto pre-consumo basati sul costo). In particolare, il numero di punti verrebbe assegnato secondo la seguente tabella:

% DEL COSTO TOTALE DEI PRODOTTI INSTALLATI PERMANENTEMENTE NEL PROGETTO	PUNTI ASSEGNATI
≥ 30%	1
≥ 40%	2
≥ 50%	3

Figura 52 - Percentuali di costo minime dei prodotti installati riportate nel Manuale GBC HB

Nel caso specifico dell'Ala del Mosca della Cavallerizza Reale, SECAP ha deciso di adottare la prima opzione, facendo ricorso a prodotti muniti di certificazione EPD.

Per calcolare il numero totale di prodotti conformi con i requisiti viene utilizzata l'equazione seguente che si basa sulla quantità di prodotti e non sul costo.

$$\text{Numero totale dei prodotti} = \left(\frac{\text{Numero di prodotti}}{\text{con EPD generico}} \times 0,5 \right) + (\text{Numero di prodotti con EPD specifico sul prodotto} \times 1)$$

In questo contesto, la possibilità di caricare e interrogare le schede di approvazione dei materiali direttamente su BimPool-AI rappresenta un passo importante verso la digitalizzazione del processo di verifica, riducendo i tempi di controllo e minimizzando il rischio di errori legati alla gestione manuale della documentazione.

3.2.3.1. L'integrazione dell'AI per verificare la presenza di certificazioni EPD

Per il raggiungimento dei due punti prefissati come obiettivo per il credito 4 – Ottimizzazione ambientale dei prodotti, il CAPITOLATO GBC HISTORIC BUILDING - PRESCRIZIONI OBBLIGATORIE ASHRAE 90.1-200 redatto per il cantiere della Cavallerizza Reale stabilisce i seguenti requisiti: *“Utilizzare almeno 10 prodotti di almeno 3 differenti produttori dotati di EPD Environmental Product Declaration. Ogni EPD, a prescindere che sia interna, esterna, specifica di prodotto o industry-wide, vale 1 prodotto equivalente. Dovrà essere fornita documentazione comprovante il reale utilizzo di tali prodotti all'interno del cantiere. Tutte le EPD devono essere conformi alle norme ISO 14025, 14040, 14044, le EN 15804 o ISO 21930.”*

Al fine di verificare che vengano rispettate tali prescrizioni si è fatto ricorso al tool di Intelligenza Artificiale integrato in BimPool, con l'obiettivo di ridurre i tempi necessari per la ricerca e l'analisi delle certificazioni EPD.

Per prima cosa sono state filtrate e selezionate le schede di approvazione materiali presenti nel grafo della conoscenza di BimPool tramite i tag che vengono creati in automatico con l'AI durante il caricamento del file. Viene, quindi, avviata la conversazione con il BOT AI.

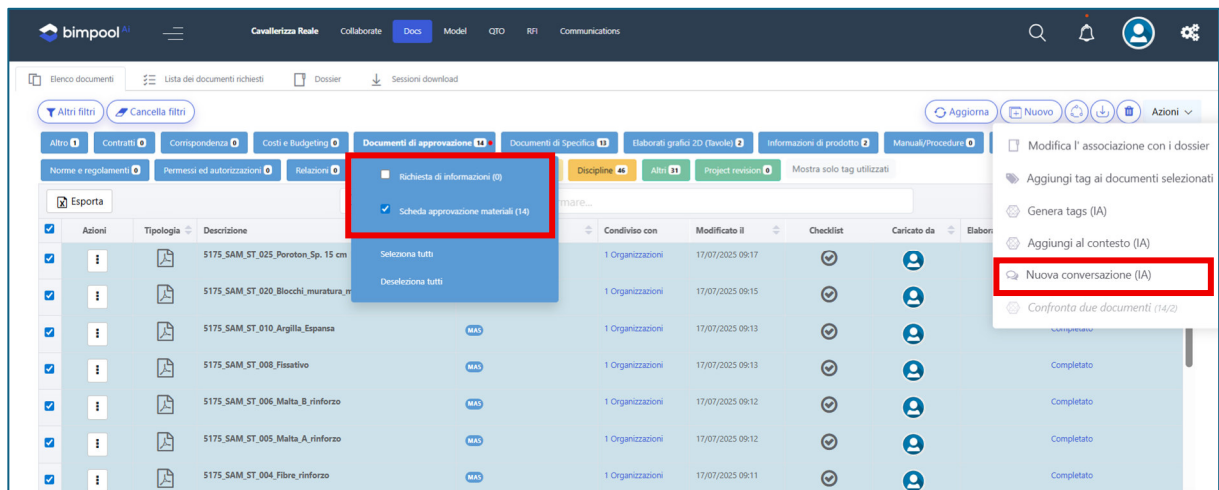


Figura 53 – Inizio della conversazione su BimPool-AI

Nell'avviare la conversazione è stata selezionata come agente di ricerca l'agente *Smart Explorer per i documenti*, interrogando contemporaneamente le schede di approvazione materiali ed il Capitolato GBC HISTORIC BUILDING - PRESCRIZIONI OBBLIGATORIE ASHRAE 90.1-200.

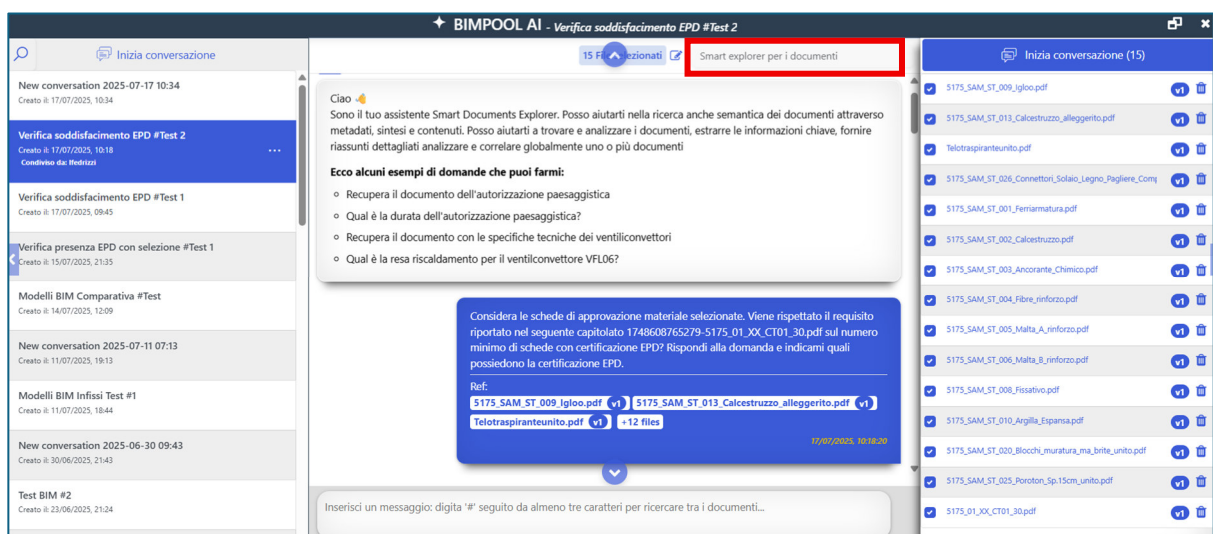


Figura 54 - scelta dell'agente di ricerca su BimPool-AI

L'AI ha inizialmente limitato la ricerca ai tag manuali, senza analizzare il contenuto integrale dei documenti, restituendo un solo materiale certificato (5175_SAM_ST_009_Igloo). Questo ha evidenziato una debolezza della piattaforma, che si manifesta in particolare quando i tag non sono generati dall'AI.

Per procedere è stata caricata nuovamente la scheda in questione facendo assegnare i tag automaticamente dall'AI. Eseguendo nuovamente l'analisi il sistema ha ampliato la ricerca ma non ha ancora individuato tutte le schede EPD. Il limite era stavolta legato al linguaggio: la query in italiano non associava correttamente l'acronimo EPD in inglese. Ripetendo la richiesta in lingua inglese il sistema ha restituito risultati coerenti.

Nella risposta il BOT ha elencato tutti i materiali conformi con riferimenti puntuali (pagine e documenti) ed una tabella riassuntiva che riportava per ciascun materiale il produttore, la presenza/assenza della certificazione ed uno "Score" di pertinenza. Quest'ultimo è un valore calcolato in base alla distanza vettoriale tra l'embedding della query e quello dei testi analizzati.

Tool: document_content_search

Una Dichiarazione Ambientale di Prodotto (EPD) è un'etichetta che offre una panoramica trasparente e multifattoriale delle prestazioni ambientali di un prodotto durante il suo ciclo di vita

[5175_SAM_ST_006_Malta_B_rinforzo.pdf](#), [8](#), [5175_SAM_ST_005_Malta_A_rinforzo.pdf](#), [9](#). L'obiettivo è presentare gli impatti ambientali potenziali dei prodotti, che possono essere combinati per calcolare gli impatti di sistemi edilizi più complessi [5175_SAM_ST_006_Malta_B_rinforzo.pdf](#), [8](#), [5175_SAM_ST_005_Malta_A_rinforzo.pdf](#), [9](#). Il pubblico di riferimento include clienti e altre parti interessate agli impatti ambientali dei prodotti [5175_SAM_ST_006_Malta_B_rinforzo.pdf](#), [8](#), [5175_SAM_ST_005_Malta_A_rinforzo.pdf](#), [9](#).

Le EPD sono conformi a standard internazionali come ISO 14025 e EN 15804 [5175_SAM_ST_001_Ferriarmatura.pdf](#), [3](#), [5175_SAM_ST_006_Malta_B_rinforzo.pdf](#), [7](#), [5175_SAM_ST_005_Malta_A_rinforzo.pdf](#), [8](#), [5175_SAM_ST_003_Ancorante_Chimico.pdf](#), [56](#).

Esempi di prodotti per i quali sono disponibili Dichiarazioni Ambientali di Prodotto includono:

- Barre di acciaio laminate a caldo [5175_SAM_ST_001_Ferriarmatura.pdf](#), [3](#), [5175_SAM_ST_001_Ferriarmatura.pdf](#), [5](#).



CONVALIDA DELLA EPD
Validation of EPD

ATTESTATO N° CERTIFICATE N°

ICMQ – 24514EPD

Si convalida che la seguente Dichiarazione Ambientale di Prodotto (DAP):
It validates that the following Environmental Product Declaration (EPD):

#	Aggiungi	Origine	Dettagli	Azioni
1	+	5175_SAM_ST_005_Malta_A_rinforzo.pdf	- pagina: 9, Score: (92.81%) - pagina: 8, Score: (91.17%) - pagina: 12, Score: (90.12%) - pagina: 18, Score: (89.48%)	...
2	+	5175_SAM_ST_009_Igloo.pdf	- pagina: 22, Score: (92.16%) - pagina: 15, Score: (90.32%) - pagina: 14, Score: (89.92%)	...
3	+	5175_SAM_ST_003_Ancorante_Chimico.pdf	- pagina: 56, Score: (93.13%) - pagina: 61, Score: (88.24%)	...
4	+	5175_SAM_ST_019_Lamiera_grecata_solai_unito.pdf	- pagina: 10, Score: (90.97%) - pagina: 14, Score: (90.51%) - pagina: 9, Score: (88.20%)	...
5	+	5175_SAM_ST_022_Ristilatura_ormata_dei_giunti_unito...	- pagina: 15, Score: (91.04%) - pagina: 16, Score: (89.90%)	...
6	+	5175_SAM_ST_001_Ferriarmatura.pdf	- pagina: 9, Score: (89.80%) - pagina: 3, Score: (89.63%)	...
7	+	5175_SAM_ST_006_Malta_B_rinforzo.pdf	pagina: 7, Score: (91.07%)	...

Figura 55 – Output della richiesta sull'analisi delle certificazioni EPD

Una volta verificata la correttezza dei risultati delle analisi svolte sulle schede di approvazione materiali, si è proceduto interrogando l'agente AI sul Capitolato GBC HB e chiedendo di trovare i riferimenti presenti nel documento che fanno riferimento alla certificazione EPD. Il bot risponde correttamente riportando i requisiti che dovrebbe avere il progetto per essere conforme, ovvero:

- Devono essere utilizzati almeno 10 prodotti, provenienti da almeno 3 produttori differenti, che siano dotati di EPD;
- Tutte le EPD devono essere conformi alle norme ISO 14025, 14040, 14044, EN 15804 o ISO 21930

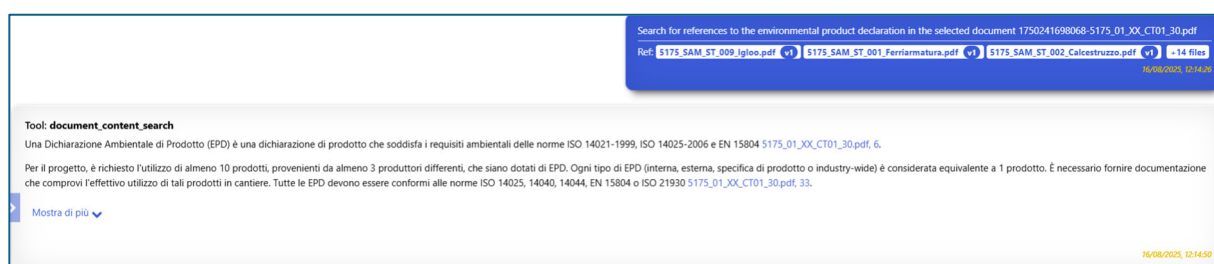


Figura 56- Richiesta di analisi del capitolato GBC

Si chiede, quindi, di considerare sia quanto riportato nel capitolato sia il contenuto delle schede di approvazione materiali e di verificare che siano rispettati i requisiti. L'AI non è ancora in grado di fornire un numero totale; infatti, risponde dicendo di aver generato una tabella con 11 righe, riportando invece una tabella vuota.

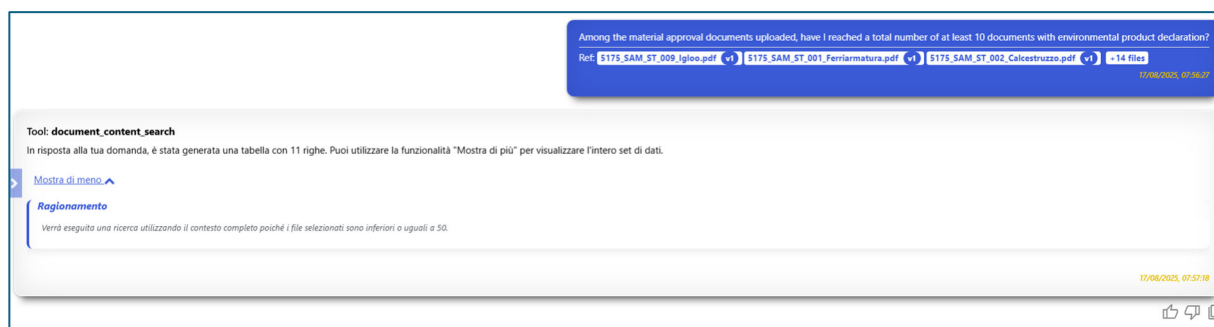


Figura 57 – Risposta non soddisfacente da parte dell'AI

Viene, quindi, richiesto all'AI di produrre una nuova tabella Excel in cui per ciascuna scheda di approvazione materiale venisse indicata l'azienda produttrice e se il documento possieda o meno la certificazione EPD.

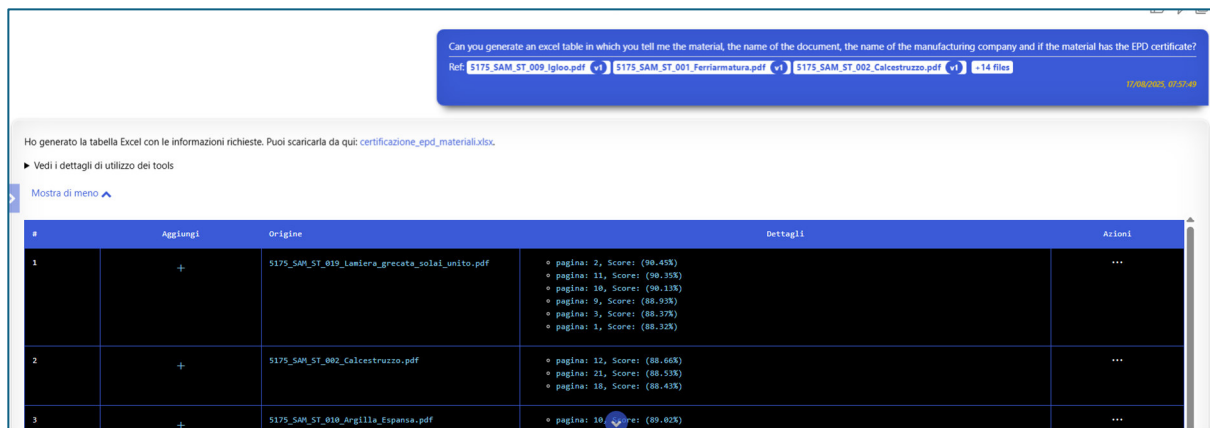


Figura 58 - Richiesta di estrapolare una tabella Excel

Il Bot risponde elaborando una tabella Excel dalla quale è possibile ricavare facilmente il numero totale di schede che rispettano i requisiti. Nel caso specifico si evince che dei 16 documenti caricati solamente 8 presentano una certificazione EPD.

Nome del documento	Materiale	Azienda produttrice	Certificato EPD
1748610691758-5175_SAM_ST_009_Igloo.pdf	Prodotti MODULO, costituiti al 100% da polipropilene riciclato/rigenerato, come il prodotto 'Igloo'	Geoplast S.p.A.	Si
1752736154435-5175_SAM_ST_001_Ferriarmatura.pdf	Barre di acciaio laminato a caldo (Hot Rolled Steel in Bars), acciaio per cemento armato, vergelle	Industrie Riunite Odolesi IRO S.p.A., ALFA ACCIAI S.p.A., FERALPI SIDERURGICA S.p.A., Ferreria Valsabbia Spa, FERRIERE NORD Spa, Manuferr Srl	Si
1752736215942-5175_SAM_ST_002_Calcestruzzo.pdf	Calcestruzzo Preconfezionato, Pietrisco (5/15 Tondo e 15/30 Tondo)	Non specificata	No
1752736251464-5175_SAM_ST_003_Ancorante_Chimico.pdf	Sistema a Iniezione fischer FIS-V-Plus (ancorante chimico per l'utilizzo nel calcestruzzo), prodotti a base di resina metacrilata	fischerwerke GmbH & Co. KG	Si
1752736287877-5175_SAM_ST_004_Fibre_rinforzo.pdf	Fibre di rinforzo	Non specificata	No
1752736326322-5175_SAM_ST_005_Malta_A_rinforzo.pdf	Malta, specificamente 'Geocalce F Antisismico'	Kerakoll S.p.A.	Si
1752736354410-5175_SAM_ST_006_Malta_B_rinforzo.pdf	Malta, specificamente 'Geocalce FL Antisismico'	Kerakoll S.p.A.	Si
1752736389927-5175_SAM_ST_008_Fissativo.pdf	Fissativo	Non specificata	No
1752736424246-5175_SAM_ST_010_Argilla_Espansa.pdf	Argilla Espansa e prodotti correlati	LATERLITE S.p.A.	No
1752736533962-5175_SAM_ST_020_Blocchi_muratura_ma_brite_unito.pdf	Blocchi per muratura	Non specificata	No
1752736608785-5175_SAM_ST_025_Poroton_Sp.15cm_unito.pdf	Poroton Sp.15cm	Non specificata	No
1755336379827-5175_SAM_ST_023_Barre_filettate_unito.pdf	Barre filettate	Non specificata	No
1755336641940-5175_SAM_ST_022_Ristilatura_armata_dei_giunti_unito.pdf	Malta, specificamente 'Geocalce F Antisismico'	Kerakoll S.p.A.	Si
1755336857457-5175_SAM_ST_021_Antiribaltamento_unito.pdf	Malta, specificamente 'Geocalce F Antisismico' e 'Geocalce FL Antisismico'	Kerakoll S.p.A.	Si
1755337120842-5175_SAM_ST_019_Lamiera_grecata_solai_unito.pdf	Lamiera Grecate in Acciaio per Solai Strutturali, Solai Collaboranti e per Coperture a Grandi Luci	SANDRINI METALLI S.p.A.	Si
1755337263232-5175_SAM_ST_017_Mattone_pieno.pdf	Mattone pieno	Non specificata	No
1750241698068-5175_01_XX_CT01_30.pdf	Capitolato tecnico, non descrive un materiale specifico	Non applicabile	No

Figura 59 - Tabella Excel generata

L'analisi ha messo in evidenza sia i punti di forza del sistema, quali la capacità di interrogare più documenti e di creare output tabellari, sia alcune criticità legate prevalentemente al linguaggio ed alla perdita occasionale di informazioni. Il workflow necessita, quindi, di perfezionamenti in termini di affidabilità semantica e gestione dei dati incompleti. Nonostante tali limiti, l'integrazione tra BIM, intelligenza artificiale e documentazione tecnica costituisce un approccio promettente per automatizzare processi tradizionalmente onerosi e ridurre sensibilmente il rischio di errore umano nei processi di gestione delle attività edilizie.

3.3. Risultati ed implicazioni pratiche nella gestione del cantiere per l'Energy Efficiency

I paragrafi precedenti mostrano chiaramente come stia evolvendo il settore dell'edilizia nell'ambito della gestione del cantiere. I risultati ottenuti nel campo dell'efficientamento energetico sono dei risultati positivi per quanto riguarda l'ottimizzazione nella gestione e nella condivisione dei dati. L'AI si è, quindi, rivelata efficace nell'automatizzare processi tradizionalmente onerosi, pur presentando ancora alcune limitazioni tecniche e semantiche.

3.3.1. Key Performance Indicator

Per misurare in maniera oggettiva le prestazioni ed i progressi di Bimpool sono stati individuati una serie di Key Performance Indicators (KPI), ovvero degli indicatori chiave dei risultati che consentono di quantificare gli avanzamenti della piattaforma rispetto agli obiettivi prefissati. Nel caso di Bimpool gli obiettivi principali individuati sono:

- ottimizzare i tempi ed i costi necessari per eseguire le analisi e le verifiche documentali o sul modello BIM;
- migliorare il flusso di condivisione delle informazioni in termini di rapidità e tracciabilità degli scambi documentali tra gli attori del progetto;
- ridurre il rischio di errore nell'eseguire analisi e controlli.

Una volta definiti gli obiettivi è stato individuato un modo per renderli quantificabili. Ciascun indicatore è stato, quindi, associato ad una scala di prestazione semaforica: verde per le prestazioni ottimali, giallo per le prestazioni soddisfacenti e rosso per le prestazioni insufficienti. Questo sistema ha consentito non solo di fotografare lo stato attuale, ma di monitorare l'evoluzione nel tempo ed identificare le aree che necessitano di interventi di miglioramento. I KPI assumono, così, un duplice ruolo: misurare l'efficacia delle soluzioni adottate nel progetto e fornire uno strumento replicabile in futuri progetti per guidare il processo di digitalizzazione e automazione della gestione del cantiere.

3.3.1.1. Ottimizzazione dei tempi

L'ottimizzazione dei tempi è il KPI più complesso da analizzare nel campo dell'edilizia. La durata delle lavorazioni è infatti molto variabile in base alla complessità del progetto, della manodopera e dei mezzi a disposizione. La strategia utilizzata in questo caso è stata quella di considerare la durata media delle conversazioni con l'agente di intelligenza artificiale fornite direttamente da BimPool e sfruttare la suddivisione dei documenti in discipline proposta dal

software. In questo modo, per ciascuna disciplina, si farà il rapporto tra la media dei tempi di risposta ed un valore standard che varierà in base alla natura del tipo di richiesta.

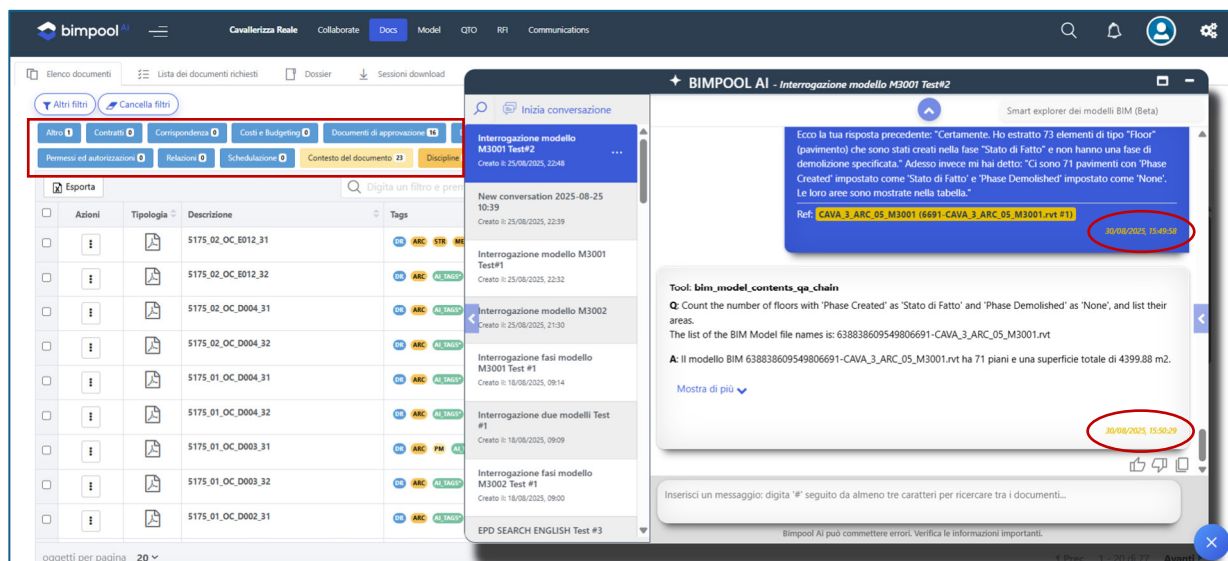


Figura 60 - Individuazione degli elementi considerati per estrapolare i dati necessari all'ottenimento del KPI sull'ottimizzazione dei tempi

Verranno di seguito mostrati due esempi: lato impresa, la verifica che le schede di approvazione materiali rispettino i requisiti imposti dai capitolati, lato BIM e GBC la quantificazione delle superfici di elementi mantenuta rispetto allo stato di fatto dell'edificio.

Per assegnare gli intervalli di prestazione si è deciso di considerare non soddisfacenti valori da 0 a 50%, mediamente soddisfacenti i valori da 51% a 80% ed ottimali i valori da 81% a 100%.

• Caso 1

Per quanto riguarda la verifica della congruenza tra le schede di approvazione materiali ed i requisiti richiesti dai capitolati si è stimato che, utilizzando il metodo tradizionale, mediamente per una singola scheda si impiegano circa 30 minuti di cui 10 minuti per l'identificazione del prodotto e circa 20 minuti per eseguire il confronto. Ciò corrisponde ad un totale di 2700 secondi. Per quanto riguarda, invece, i dati rilevati da BimPool, la durata media di una conversazione che prende in analisi dei documenti è di circa 150 secondi.

Il KPI sarà, quindi, ottenuto dalla seguente equazione:

$$\begin{aligned} \text{Tempo risparmiato (\%)} &= 100 - \frac{\text{Tempo medio di risposta Bimpool (s)}}{\text{Tempo medio metodo tradizionale (s)}} * 100 = 100 - \frac{150}{2700} * 100 \\ &= 94,4\% \end{aligned}$$

Considerando la scala di prestazione semaforica, una percentuale di tempo risparmiato pari al 94,4% si posiziona nella fascia dei risultati ottimali.



Figura 61 - Quantificazione del KPI sull'ottimizzazione del tempo per l'analisi di documenti

La dashboard evidenzia chiaramente l'ottimizzazione in termini di tempo se si utilizza la piattaforma BimPool-AI invece di eseguire le procedure manualmente.

- **Caso 2**

Nel caso di interrogazione del modello BIM le stime sono più complesse in quanto il tempo effettivo dipende dalle conoscenze basilari del professionista in campo BIM e dall'accuratezza del modello. Ipotizzando di essere un professionista medio e di avere un modello completo dei dati necessari, si stima un tempo di circa 1 ora e 20 minuti di cui 10 minuti per definire gli elementi che si vogliono misurare, 40 minuti per creare un abaco delle quantità con raggruppamenti e filtri impostati correttamente, 20 minuti per verificare nel modello 3D di aver considerato gli elementi corretti e 10 minuti per esportare i risultati. Per quanto riguarda i dati provenienti da BimPool, anche in questo caso, come per il caso 1, è stata presa in considerazione la durata di un'intera conversazione e non solamente di risposta alla singola domanda. L'analisi dei dati ha riportato una durata media delle conversazioni inerenti il modello BIM di circa 180 secondi.

Il KPI sarà, quindi, ottenuto dalla seguente equazione:

$$\begin{aligned} \text{Tempo risparmiato (\%)} &= 100 - \frac{\text{Tempo medio di risposta Bimpool (s)}}{\text{Tempo medio metodo tradizionale (s)}} * 100 = 100 - \frac{180}{4800} * 100 \\ &= 96,3\% \end{aligned}$$

Anche in questo caso il valore ottenuto si configura come un risultato appartenente alla fascia Ottimale, dimostrando quanto sarebbe conveniente utilizzare la piattaforma AI per ottenere informazioni sul modello BIM.



Figura 62 - Quantificazione KPI sull'ottimizzazione del tempo nell'analisi di modelli BIM

Per quanto riguarda le prestazioni della piattaforma in termini di risparmio di tempo i miglioramenti risultano significativi ed evidenti se paragonati ad un processo tradizionale. Il tool di intelligenza artificiale, infatti, non richiede tempi di elaborazione troppo lunghi neppure in presenza di richieste complesse che comportano l'analisi di una mole significativa di dati. È tuttavia opportuno sottolineare come il KPI relativo all'efficienza temporale risulti strettamente connesso a quello riguardante l'affidabilità delle risposte: la riduzione dei tempi può, infatti, tradursi in un reale beneficio operativo soltanto qualora i dati restituiti siano attendibili e coerenti.

3.3.1.2. Accuratezza dei dati

Per valutare l'accuratezza delle risposte fornite dalla piattaforma, è stato definito un KPI sull'affidabilità dei dati, calcolato come rapporto tra il numero di risposte ritenute soddisfacenti dall'utente e il numero totale di interrogazioni effettuate.

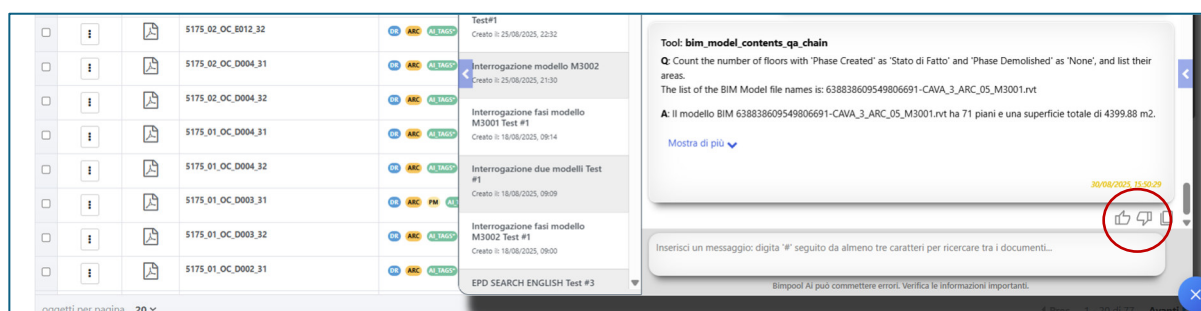


Figura 63 – Dato relativo al soddisfacimento degli utenti

Le analisi hanno riportato che su un totale di 152 domande valutate, 79 hanno avuto un esito positivo e 73 non sono invece state apprezzate dall'utente. L'indicatore è stato, quindi, quantificato secondo la seguente formula:

$$\text{Risposte con esito positivo (\%)} = \frac{\text{Esiti positivi}}{\text{Risposte totali}} * 100 = \frac{79}{152} * 100 = 52\%$$



Figura 64 - Quantificazione KPI sul soddisfacimento degli utenti per le risposte ottenute

Il valore di KPI raggiunto, pari al 52%, non è ancora pienamente soddisfacente, ma è coerente con lo stato di sviluppo sperimentale in cui la piattaforma si trova attualmente. Per questa tipologia di analisi sono state definite tre fasce prestazionali: la fascia rossa per i valori compresi tra 0% al 50% indicativa di prestazioni critiche; la fascia gialla per i valori dal 50% all'80% che corrisponde ad un livello intermedio di affidabilità e la fascia verde per i valori superiori all'80% rappresentativa di prestazioni ottimali. Un'analisi più accurata dei dati, tuttavia, evidenzia un aspetto di particolare interesse: la percentuale di risposte con esito positivo è progressivamente aumentata negli ultimi tre mesi, passando dal 56% di giugno, al 66,7% di luglio, fino a raggiungere l'80% in agosto. Questo andamento, sebbene ancora poco attendibile data la differenza nella distribuzione delle richieste nei tre mesi, suggerisce un processo di progressivo affinamento delle prestazioni della piattaforma, attribuibile sia al miglioramento degli algoritmi sia alla maggiore quantità di dati integrati nel grafo della conoscenza.

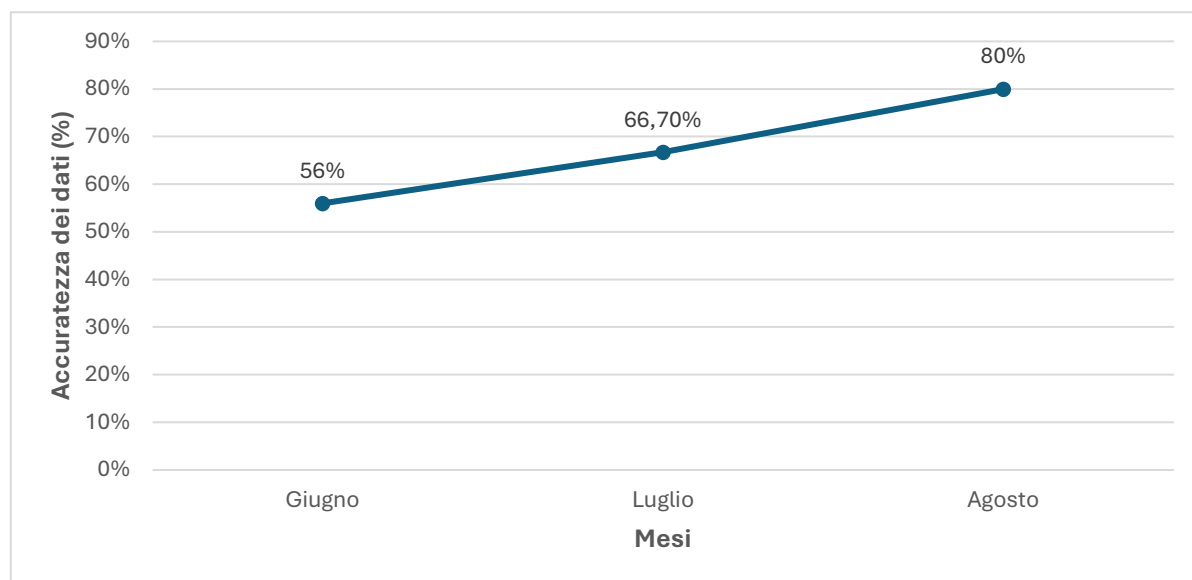


Figura 65 - Andamento degli esiti soddisfacenti nel corso dei mesi

L'analisi delle conversazioni svolte nei mesi di giugno, luglio e agosto consente di evidenziare in maniera concreta il processo di progressivo miglioramento dell'agente di intelligenza artificiale. Nel mese di giugno il tool mostrava ancora limitazioni significative, come l'incapacità di ricercare correttamente un termine all'interno di un documento in formato PDF.

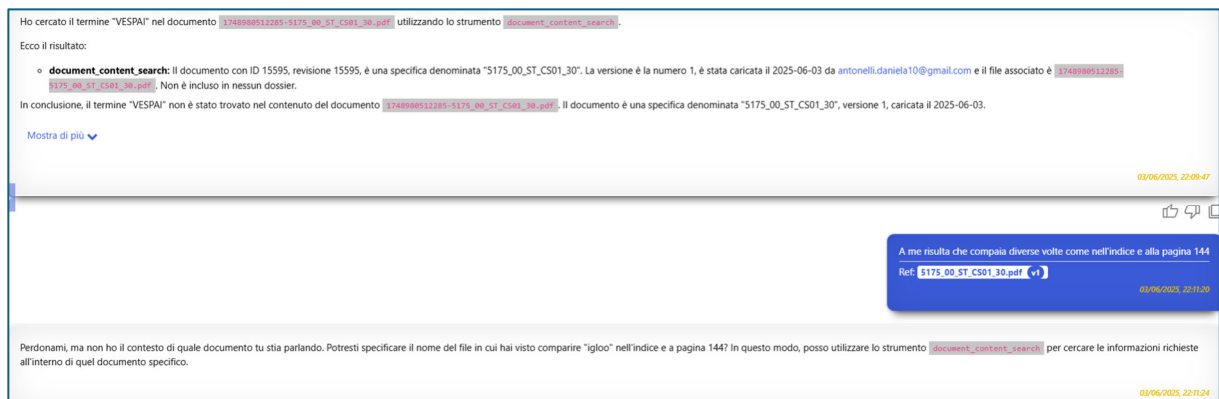


Figura 66 - Esempio conversazione con esito negativo svolta nel mese di giugno

Già a partire dal mese di luglio, invece, l'agente è risultato in grado di analizzare simultaneamente due documenti distinti, individuando discrepanze come illustrato nella Figura 66 in cui è stata verificata la coerenza tra la scheda di approvazione del calcestruzzo alleggerito e quanto riportato nel capitolato.

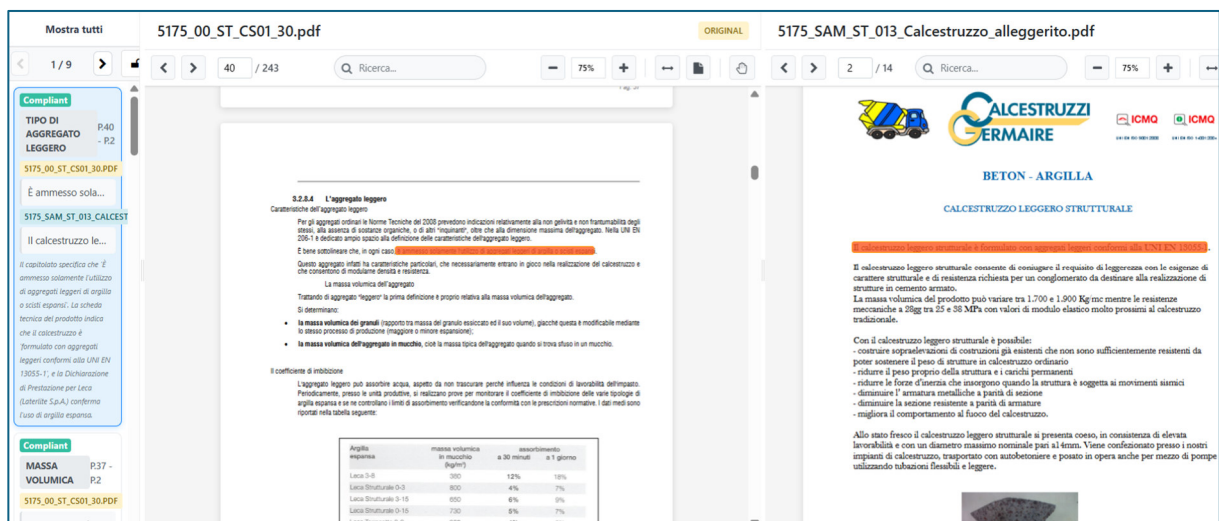


Figura 67 - Esempio di conversazione svolto nel mese di luglio

Infine, nel mese di agosto, l'evoluzione si è ulteriormente consolidata e, come mostrato nel paragrafo relativo alla verifica sulle certificazioni EPD, il BOT ha dimostrato la capacità di processare più documenti in contemporanea, restituendo una tabella Excel riassuntiva in cui isolava con precisione gli elementi di interesse per ciascun documento analizzato.

Tale progressione non solo conferma l'affinamento degli algoritmi sottostanti, ma evidenzia anche il potenziale della piattaforma nell'assicurare analisi sempre più accurate ed efficienti.

Dopo aver individuato i diversi indicatori di prestazione (KPI) viene di seguito proposta una sintesi dei risultati ottenuti. La tabella seguente riporta le percentuali ottenute per ciascun indicatore analizzato con il relativo colore associato appartenente alla scala semaforica.

TABELLA 4 – Sintesi dei KPI ottenuti

Key Performance Indicator	Descrizione del KPI	%KPI	
Ottimizzazione dei tempi	Caso 1 – Smart Explorer for documents	94,4%	
	Caso 2 – Smart Explorer for Models	96,3%	
Accuratezza della risposta	Affidabilità della risposta per il mese di giugno	56%	
	Affidabilità della risposta per il mese di luglio	66,70%	
	Affidabilità della risposta per il mese di agosti	80%	
	Affidabilità della risposta complessiva	52%	

Dalla sintesi emerge come, nonostante sia ancora necessario apportare dei miglioramenti in termini di accuratezza delle risposte, la piattaforma abbia mostrato progressivi e significativi miglioramenti sia in termini di riduzione dei tempi, sia per quanto riguarda l'affidabilità dei risultati, confermando la validità dell'approccio proposto e ponendo le basi per ulteriori sviluppi futuri.

4. Conclusioni e sviluppi futuri

Il lavoro di ricerca svolto si inserisce nel quadro di un progetto particolarmente complesso quale la rigenerazione della Cavallerizza Reale di Torino. Questo è, infatti, caratterizzato dalla necessità di coniugare due esigenze: rispettare il patrimonio storico con i limiti imposti dalla Soprintendenza e, al tempo stesso, il soddisfacimento dei requisiti di sostenibilità richiesti dalle certificazioni ambientali. Sono, quindi, stati approfonditi tre temi principali: la gestione informativa e l'impiego del Building Information Modeling (BIM), l'applicazione del protocollo GBC Historic Building con specifico riferimento alla sezione Materiali e Risorse, e la sperimentazione della piattaforma BimPool-AI come strumento di supporto per ottimizzare le procedure di analisi dei requisiti previsti dal protocollo.

Il percorso metodologico seguito ha permesso di individuare una serie di procedure replicabili con lo scopo di automatizzare attività le ripetitive e caratterizzate dalla necessità di consultare una cospicua mole di dati. Viene di seguito riportato il flowchart, che consente di visualizzare la procedura applicata, dove vengono evidenziati i passaggi replicabili in altri cantieri e contesti complessi.

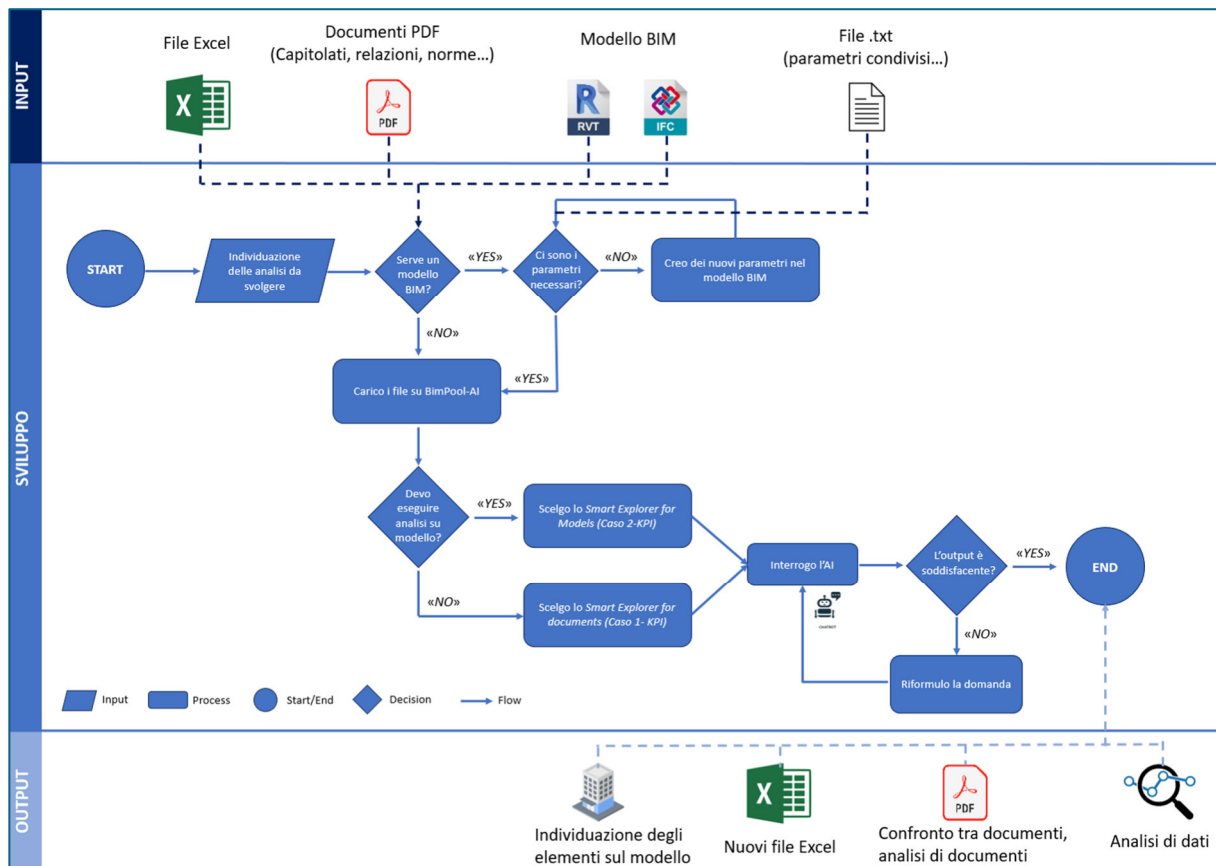


Figura 68 - Flowchart rappresentativo della metodologia applicata

L'analisi svolta ha evidenziato numerosi punti di forza, quali la possibilità di integrare le informazioni contenute nel modello BIM con i dati documentali ed una significativa riduzione dei tempi grazie all'interrogazione dell'AI. Allo stesso tempo, però, sono emerse alcune criticità come l'accuratezza delle risposte che, seppur mostrando un trend di miglioramento, non risulta ancora pienamente soddisfacente, e la presenza di alcuni bug operativi legati principalmente alla comprensione semantica dei documenti.

Implementare una soluzione di questo tipo apporterebbe benefici a diversi attori del processo edilizio quali: le imprese di costruzione, alle quali consentirebbe di ridurre i tempi ed i costi legati alle attività di verifica e rendicontazione; ai progettisti, perché offrirebbe supporto nella gestione di grandi moli di dati e nella redazione delle documentazioni richieste; agli enti di certificazione, perché metterebbe a disposizione dati digitalizzati, tracciabili e facilmente verificabili, oltre a fornire un potente strumento di analisi. Affinché la piattaforma diventi uno strumento pienamente attendibile ed efficace sarà ancora necessario perfezionare gli algoritmi di intelligenza artificiale per ridurre gli errori e migliorare la comprensione semantica dei documenti. La ricerca svolta costituisce solamente un primo passo verso l'innovazione digitale che rivoluzionerà il mondo delle costruzioni, aprendo la strada a futuri sviluppi. Tra questi, si avranno sicuramente l'integrazione della piattaforma con banche dati esterne in modo da arricchire le fonti informative disponibili, per poi passare all'estensione della metodologia alla verifica dei Criteri Ambientali Minimi (CAM) ed alla sperimentazione dell'intelligenza artificiale nelle fasi di manutenzione e gestione dell'edificio nell'ottica del facility management digitale.

La stessa BimPool-AI sta implementando una nuova funzione che prevede di creare un collegamento diretto (plug-in) tra la piattaforma ed il modello BIM su Revit in modo da facilitare la ricerca e la visualizzazione delle informazioni e da ridurre i rischi legati alla perdita dei dati. Questo funzionerà tramite un protocollo MCP (Model Context Protocol), ovvero uno standard aperto che permette di creare una connessione bidirezionale per le applicazioni di AI, consentendo agli LLM¹⁰ di comunicare con dati, applicazioni e servizi esterni.

¹⁰ Large Language Model: modelli di machine learning in grado di comprendere e generare testo in linguaggio umano tramite l'analisi di set di dati di linguaggio.

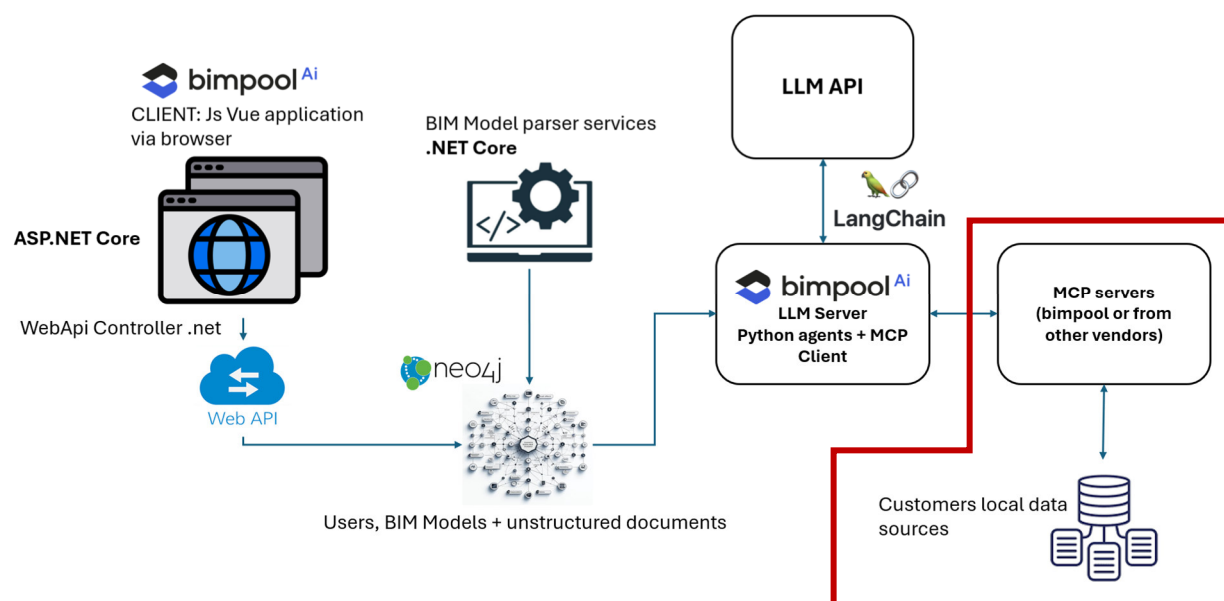


Figura 69 - Architettura della piattaforma BimPool-AI con integrata la funzionalità plug-in di Revit

Questa implementazione evidenzia come il settore dell'edilizia si stia avvicinando sempre di più all'ottica del cantiere digitale. In tale scenario, il lavoro svolto rappresenta un contributo metodologico concreto, capace di anticipare un modello operativo che potrà essere esteso a contesti diversi da quello analizzato. La prospettiva è, quindi, quella di una progressiva automazione volta a comprendere non solo le fasi di progettazione e costruzione, ma anche quelle di gestione e manutenzione, mostrando che anche il settore dell'edilizia è in linea con gli obiettivi europei di digitalizzazione e sostenibilità.

5. Bibliografia

- [1] ANCE (2025) Report: *Analisi del livello di maturità tecnologica/digitale degli Associati ANCE*
- [2] Aparo Martina (2022), *La Cavallerizza di Alfieri – Liti e storie di cantiere*.
- [3] Aritra P., Jacob J. Lin, Shang-Hsien H., Mani G. (2023), *Automated vision-based construction progress monitoring in built environment through digital twin, Developments in the Built Environment*, Volume 16, <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100247> --> DT
- [4] Babenko K. (2022), *Conoscere per conservare – Implicazioni progettuali della lettura costruttiva dell'architettura storica: la manica del Mosca nella Cavallerizza Reale di Torino*, Politecnico di Torino;
- [5] Castagnone A., Capriulo C. (-), *BIM STRUTTURALE: I FORMATI DEI FILE PER L'INTEROPERABILITÀ*, S.T.A. DATA Structural Software.
- [6] Dalir A. H., Pezeshki Z., Ravanshadnia M., Krinitsky E., Sultanguzin I. A. (2025), *Automatic Monitoring in Construction Projects: Scientometric Analysis and Visualization of Research Activities*, <https://doi.org/10.1007/s44230-025-00089-3>
- [7] Eastman C., Teicholz P., Sacks R., Liston K. (2008), *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers, and Contractors*. John Wiley & Sons, Inc.
- [8] Elsharkawi H., Elbeltagi E., Eid M. S., Alattyih W., Wefki H. (2025), *Construction Payment Automation Through Scan-to-BIM and Blockchain Enabled Smart Contract. Buildings*, 15, 213. <https://doi.org/10.3390/buildings15020213>;
- [9] Faiz F., Ninduwezuor-Ehiobu N., Adanma U. M., Solomon N. O. (2024), *Blockchain for sustainable waste management: Enhancing transparency and accountability in waste disposal, Comprehensive Research and Reviews in Science and Technology*, 2024, 02(01), 045–069, Article DOI: <https://doi.org/10.57219/crrst.2024.2.1.0032> ;
- [10] Fernandes, D.; Garg, S.; Nikkel, M.; Guven, G. (2024), A GPT Powered Assistant for Real-Time Interaction with Building Information Models. *Buildings*, 14, 2499. <https://doi.org/10.3390/buildings14103234> ;
- [11] Jensen F.W., Gade P.N. (2022) *BIM Standards and Classification Systems in Data Validation*, DOI: [10.7146/aui.455.c230](https://doi.org/10.7146/aui.455.c230)
- [12] Jingyi X., Minghui C., Anchen S. (2025), *Assessing sustainable practices in architecture: A data-driven analysis of LEED certification adoption and impact in top*

- firms from 2000 to 2023*, KeAi, Vol.14(3), 784-496,
<https://doi.org/10.1016/j.foar.2024.10.002>
- [13] Lenzi A. (2021-2022) VANTAGGI E CRITICITA' DEL BIM PER INTERVENTI SU INFARSTUTTURE ESISTENTI A PICCOLA SCALA: IL CASO STUDIO DI SAN MICHELE E GRATO - Relatore Prof. Ing. Orazio Baglieri Correlatore Candidato PhD. Davide Masera;
- [14] Liu, X., Antwi-Afari, MF, Li, J., Zhang, Y., & Manu, P. (2025). *BIM, IoT, and GIS integration in construction resource monitoring*. *Automation in Construction*, 174 , articolo 106149. Pubblicazione anticipata online. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106149>
- [15] OICE (2024) 7° REPORT OICE SULLA DIGITALIZZAZIONE E SULLE GARE BIM 2023;
- [16] Salman A., Wade C.A., Darren O., Irtishad A. (2011), *Building information modeling for sustainable design and LEED® rating analysis*, ELSEVIER, Vol.20(2), 217-224, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.09.019>
- [17] Sururah A. , Lukumon O. , Lukman A. , Abdul-Lateef B. (2020), *Cloud computing for chatbot in the construction industry: An implementation framework for conversational-BIM voice assistant*, <https://doi.org/10.1016/j.dte.2024.100031>
- [18] Zheng, J., Fischer, M., 2023. BIM-GPT: a prompt-based virtual Assistant framework for BIM information retrieval. arXiv preprint. <https://doi.org/10.48550/arXiv.230409333>
- [19] Zollmann S., Hoppe C., Kluckner S., Poglitsch C., Reitmayr G. (2014), *Augmented Reality for Construction Site Monitoring and Documentation*
- [20] Graphisoft, GUIDA COMPLETA AL FORMATO IFC SEGRETI E APPLICAZIONI DEL MODELLO INTEROPERABILE PER L'INDUSTRIA DELLE COSTRUZIONI
- [21] McKinsey Global Institute: 2023 The economic potential of generative AI

6. Sitografia

- [22] <https://biblus.acca.it/limiti-del-bim-barriere-utilizzo-building-information-modeling/>
- [23] <https://www.ingenio-web.it/articoli/il-modello-bim-in-fase-di-esecuzione-criticita-ed-uso-per-le-imprese/>
- [24] <https://biblus.acca.it/bim-data-cosa-sono/>
- [25] <https://www.ingenio-web.it/articoli/bim-e-pubblica-amministrazione-a-che-punto-siamo/>
- [26] <https://www.archiradar.it/it/libri/tutorial-archicad-artlantis/archicad/il-formato-ifc-bim-archicad-solibri>.
- [27] <https://www.acca.it/open-bim-vs-closed-bim..>
- [28] <https://biblus.acca.it/formato-ifc-tutto-quello-che-occorre-sapere/>
- [29] <https://tc-catalogue.strongerstories.org/stories/conversational-bim-2/>
- [30] <https://www.musaformazione.it/blog/il-bim-nel-nuovo-codice-appalti-una-rivoluzione-digitale-per-ledilizia-pubblica/>
- [31] <https://www.istat.it/comunicato-stampa/censimento-permanente-delle-imprese-2023-primi-risultati/>
- [32] [https://www.01building.it/condivisione-bim-cloud-pro-
contro/#:~:text=I%20vantaggi%20di%20questa%20architettura,e%20valutare%20pres
tazioni%20e%20risultati](https://www.01building.it/condivisione-bim-cloud-pro-
contro/#:~:text=I%20vantaggi%20di%20questa%20architettura,e%20valutare%20pres
tazioni%20e%20risultati)
- [33] <https://www.bimportale.com/bim-caratteristiche-vantaggi-operativi-seconda-parte/>
- [34] <https://biblus.acca.it/opencde-futuro-della-collaborazione-bim/>
- [35] <https://www.smeup.com/magazine/blog/autodesk-forge-caratteristiche/>
- [36] [https://it.wikipedia.org/wiki/Bibliometria#:~:text=L'analisi%20bibliometrica%20%C3%
%A8%20quella,misurazione%20del%20fattore%20di%20impatto](https://it.wikipedia.org/wiki/Bibliometria#:~:text=L'analisi%20bibliometrica%20%C3%
%A8%20quella,misurazione%20del%20fattore%20di%20impatto).
- [37] <https://www.museotorino.it/view/s/f9695f4625ba437ea1fed462e27dac71>
- [38] [https://www.compagniadisanpaolo.it/it/progetti/cavallerizza-
reale/#:~:text=La%20Cavallerizza%20sar%C3%A0%20un%20luogo,di%20convivenz
a%20e%20scambio%20culturale](https://www.compagniadisanpaolo.it/it/progetti/cavallerizza-
reale/#:~:text=La%20Cavallerizza%20sar%C3%A0%20un%20luogo,di%20convivenz
a%20e%20scambio%20culturale).
- [39] [https://www.esg360.it/environmental/architettura-sostenibile-definizione-
bioarchitettura-e-green-building/](https://www.esg360.it/environmental/architettura-sostenibile-definizione-
bioarchitettura-e-green-building/)
- [40] <https://www.politecnica.it/portfolio/progetti-restauro-cavallerizza-reale-torino/>
- [41] <https://www.zucchiarchitetti.com/projects/public/cavallerizza-reale/>
- [42] <https://www.secapspa.it/progetti/cavallerizza-reale-torino/>
- [43] <https://www.mybosswas.it/mygraphics/brains-digital/>

- [44] Slides Bimpool-AI
- [45] <https://blog.logto.io/it/what-is-mcp>
- [46] <https://help.autodesk.com/view/RVT/2015/ITA/?guid=GUID-66829195-1E29-493D-B24C-B25A5A099081>
- [47] <https://www.infobuild.it/progetti/torino-cino-zucchi-progetto-cavallerizza-reale/>
- [48] <https://biblus.acca.it/modelli-federati-bim-cosa-sono/>
- [49] <https://www.ingenio-web.it/articoli/gbc-historic-building-r-la-certificazione-per-la-sostenibilita-degli-interventi-di-restauro-sugli-immobili/>
- [50] <https://www.headvisor.it/kpi-key-performance-indicator#kpi-indici-di-performance>
- [51] <https://www.rifiutoo.com/blog/differenza-tra-codici-cer-err/>
- [52] <https://www.infobuild.it/approfondimenti/gestione-rifiuti-da-cantiere-rentri/>
- [53] <https://monade.io/tech/come-funzionano-gli-embedding/>
- [54] Greco L. <https://www.cribis.com/it/approfondimenti/pnrr-l-italia-investe-su-sostenibilita-e-transizione-ecologica/>
- [55] <https://portale.assimpredilance.it/articoli/i-criteri-esg-dal-pnrr-alle-linee-guida-eba-sulla-concessione-del-credito>
- [56] <https://cloud.google.com/discover/what-is-model-context-protocol?hl=it>
- [57] <https://biblus.acca.it/scan-to-bim-da-rilievo-laser-scanner-al-modello-bim/>
- [58] <https://www.conio.com/supporto/faq/cos-e-chainlink>
- [59] <https://www.cloudflare.com/it-it/learning/ai/what-is-large-language-model/>

7. Indice delle figure

Figura 1 – Risultati del sondaggio sull'utilizzo del BIM da parte delle imprese - ANCE (2025)	9
Figura 2 - Risultato del sondaggio sulla formazione del personale in ambito digitale – ANCE (2025)	10
Figura 3 - Contenuti del modello BIM.....	11
Figura 4 - Capitoli costituenti la norma UNI 11337	12
Figura 5 - Struttura dei dati nel formato IFC - A. Borrmann	14
Figura 6 – Rapporto McKinsey 2023 sull’impatto della GenAI nelle imprese	17
Figura 7 – risultato del sondaggio sul contributo futuro dell’AI nelle imprese – ANCE (2025)	18
Figura 8 – risultato del sondaggio sugli investimenti previsti da parte delle imprese nell’AI – ANCE (2025)	19
Figura 9 – Evoluzione delle interazioni con il modello BIM attraverso il Conversational BIM (Sururah A., 2020)	20
Figura 10 – Schema rappresentativo del funzionamento del Conversational BIM (Sururah A., 2020).....	20
Figura 11 – Schema rappresentativo del funzionamento del framework BIM-GPT (Zheng, 2023).....	21
Figura 12 – Schema rappresentativo del funzionamento della metodologia DAVE (Fernandes, Garg, Nikkel, & Guven, 2024)	22
Figura 13 – Schema rappresentativo della metodologia basata sulla blockchain, (Elsharkawi H., 2025).....	24
Figura 14 - Esempio di utilizzo del BIM-to-field e dell'adozione delle codifiche cromatiche (Zollmann S., 2014)	25
Figura 15 - Mappatura bibliometrica, Network Visualization, realizzata con VOSViewer....	29
Figura 16 – Mappatura bibliometrica, Density Visualization, realizzata con VOSViewer.....	29
Figura 17 – BIM-AI-Sostenibilità diagramma dei gap	31
Figura 18 - Il complesso dell’Accademia e della Cavallerizza secondo il progetto di Amedeo di Castellamonte, 1674 (da Theatrum Sabaudiae, I). - museotorino.it.....	36
Figura 19 -Benedetto Alfieri, Le due testate di detta Cavallerizza. Spaccato in lungo della medesima con la paggeria (1763). Archivio di Stato di Torino, Corte.....	37
Figura 20 - Unità minime di intervento – Relazione generale del progetto esecutivo fornito da Secap S.p.A.	39

Figura 21 - Figure coinvolte nel cantiere della Cavallerizza Reale	40
Figura 22 - Render della Piazzetta Fratelli Vasco vista dall'ingresso di via Verdi, infobuild.	41
Figura 23 - Sistema di codifica dei modelli BIM.....	42
Figura 24 – Sistema di codifica dei documenti	42
Figura 25 - Check List dei crediti GBC HB previsti per l'Ala del Mosca	43
Figura 26 - Check List GBC HB crediti previsti per la manica delle Pagliere	44
Figura 27 - Porzione dei requisiti della CheckList GBC HB analizzata.....	45
Figura 28 - Struttura rappresentativa del funzionamento della piattaforma BimPool-AI.....	46
Figura 29 - Schermata iniziale della piattaforma BimPool-AI	47
Figura 30 - Caricamento dei documenti e assegnazione dei tag	48
Figura 31 - Esempio di avvio di una conversazione con scelta dell'agente di ricerca	49
Figura 32 - Procedura seguita per individuare la metodologia applicativa.....	50
Figura 33 - Tabella con percentuali minime da riciclare riportate nel manuale GBC HB	52
Figura 34 - Definizione del parametro "Codice CER" su Revit	53
Figura 35 -Esempio di conversazione BimPool per l'estrazione degli elementi con assegnato un codice CER.....	54
Figura 36 - Definizione dei filtri su Revit.....	54
Figura 37 - Risultati ottenuti dall'abaco di Revit	55
Figura 38 - Esempio di conversazione su BimPool-AI in cui viene richiesto di creare una tabella Excel riportante i dati contenuti nei FIR	55
Figura 39 - Definizione delle Fasi su Revit	60
Figura 40 - Assegnazione dei filtri delle fasi	60
Figura 41 – Definizione della sostituzione grafica	61
Figura 42 - Creazione di una nuova vista.....	61
Figura 43 - Creazione di una nuova vista condivisa	62
Figura 44 - Caricamento del modello sulla piattaforma BimPool-AI.....	62
Figura 45 - Esempio di conversazione per il calcolo delle superfici mantenute.....	64
Figura 46 - Creazione abaco delle quantità dei pavimenti.....	65
Figura 47 - Abaco delle pavimentazioni esistenti	66
Figura 48 - Abaco delle pavimentazioni demolite	67
Figura 49 – Abaco delle pavimentazioni mantenute	68
Figura 50 - Esempio di conversazione con richiesta di visualizzazione delle pavimentazioni mantenute	69
Figura 51 - Visualizzazione delle pavimentazioni mantenute su Bimpool-AI.....	69

Figura 52 - Percentuali di costo minime dei prodotti installati riportate nel Manuale GBC HB	71
Figura 53 – Inizio della conversazione su BimPool-AI	72
Figura 54 - scelta dell'agente di ricerca su BimPool-AI	72
Figura 55 – Output della richiesta sull’analisi delle certificazioni EPD	73
Figura 56 - Richiesta di analisi del capitolato GBC.....	74
Figura 57 – Risposta non soddisfacente da parte dell’AI	74
Figura 58 - Richiesta di estrapolare una tabella Excel	75
Figura 59 - Tabella Excel generata.....	75
Figura 60 - Individuazione degli elementi considerati per estrapolare i dati necessari all’ottenimento del KPI sull'ottimizzazione dei tempi	77
Figura 61 - Quantificazione del KPI sull'ottimizzazione del tempo per l'analisi di documenti	78
Figura 62 - Quantificazione KPI sull'ottimizzazione del tempo nell'analisi di modelli BIM .	79
Figura 63 – Dato relativo al soddisfacimento degli utenti	79
Figura 64 - Quantificazione KPI sul soddisfacimento degli utenti per le risposte ottenute....	80
Figura 65 - Andamento degli esiti soddisfacenti nel corso dei mesi.....	80
Figura 66 - Esempio conversazione con esito negativo svolta nel mese di giugno	81
Figura 67 - Esempio di conversazione svolto nel mese di luglio.....	81
Figura 68 - Flowchart rappresentativo della metodologia applicata	83
Figura 69 - Architettura della piattaforma BimPool-AI con integrata la funzionalità plug-in di Revit	85