



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO  
SCUOLA POLITECNICA

Laurea Magistrale in Ingegneria Civile (LM-23)

Dipartimento di Ingegneria

IL BIM PER LA PROGETTAZIONE INTEGRATA  
ARCHITETTONICA E STRUTTURALE

TESI DI LAUREA DI  
**ALESSANDRO PISCIOTTA**

RELATORE  
**PROF. PIERO COLAJANNI**  
CORRELATORE  
**PROF.SSA LAURA INZERILLO**

---

ANNO ACCADEMICO 2022 – 2023

MAGISTRALE





## INDICE

ABSTRACT (IT) .....	5
ABSTRACT (EN) .....	7
1. INTRODUZIONE.....	9
1.1 Le dimensioni del BIM.....	12
1.2 Sviluppo degli oggetti BIM: Level of Development (LOD) .....	16
1.3 Livelli di maturità del BIM.....	18
1.4 Il BIM nel contesto internazionale e nazionale .....	21
1.5 Il BIM nel Nuovo Codice degli Appalti (d.lgs.36/2023).....	28
1.6 Standard internazionali e normative tecniche di riferimento.....	30
2. INTEROPERABILITÀ NELLA PROGETTAZIONE BIM.....	35
2.1 Standard buildingSMART: IFC e MVD .....	40
- IFC (Industry Foundation Classes) .....	41
- MVD (Model View Definitions) .....	49
2.2 Stato dell'arte sull'interoperabilità architettonico-strutturale nel BIM .....	55
3. CASO STUDIO: INTEROPERABILITÀ E WORKFLOW BIM PER LA PROGETTAZIONE INTEGRATA ARCHITETTONICA E STRUTTURALE .....	101
3.1 Dal modello architettonico al modello strutturale .....	105
3.2 Dal modello strutturale all'analisi strutturale .....	113
3.3 Modello strutturale di Revit e test di interoperabilità.....	140
- Interoperabilità Revit-Robot.....	152
3.4 Dal modello strutturale al modello architettonico .....	158
3.5 Modellazione MEP: impianto idrico-sanitario .....	169
3.6 Modello federato e controllo delle interferenze .....	172
3.7 Dal modello architettonico alla realtà virtuale .....	177
4. CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI .....	183
BIBLIOGRAFIA .....	185
SITOGRAFIA .....	188
INDICE DELLE FIGURE.....	190
INDICE DELLE TABELLE.....	200
RINGRAZIAMENTI .....	202





## **ABSTRACT (IT)**

L'applicazione della metodologia BIM (Building Information Modeling) si trova oggi in fase di forte crescita nell'industria dell'architettura, dell'ingegneria e delle costruzioni (AEC), spinta anche da normative nazionali che hanno incentivato, e in alcuni casi anche obbligato, la sua applicazione.

Le nuove prospettive aperte dai software parametrici appaiono come delle soluzioni di lavoro che migliorano l'efficienza all'approccio della gestione del progetto edile. Interoperabilità, modellazione object-oriented, integrazione tecnologica, simultaneità operativa, sono solamente alcuni degli aspetti che i nuovi mezzi di progettazione offrono ai progettisti.

Nella prima parte del presente lavoro di tesi, vengono introdotti alcuni degli aspetti aggiornati della metodologia BIM, i quali sono stati oggetto di revisione continua negli ultimi anni. In aggiunta, si riporta la panoramica dell'attuale stato normativo che regola il BIM, sia in ambito nazionale che internazionale.

Il focus principale di questa tesi è quello relativo all'aspetto dell'interoperabilità tra le discipline architettonica e strutturale, concentrandosi maggiormente sull'interscambio delle informazioni tra i software di BIM Authoring e i software di calcolo strutturale (BIM to FEM).

Oltre ad una ricerca dettagliata sull'attuale stato dell'arte relativo all'interoperabilità BIM to FEM, viene riportata una panoramica aggiornata di quelli che sono gli standard internazionali sviluppati da buildingSMART a tale fine, in particolare: l'IFC (Industry Foundation Classes) e l'MVD (Model View Definitions).

Si è posta particolare attenzione ai limiti principali dell'analisi strutturale all'interno del processo BIM nella lettura codificata tra gli elementi strutturali e la loro indagine nel processamento parametrico dei software preposti.

A tal fine è stato proposto, come caso studio, il progetto di un fabbricato a cinque elevazioni su pianta rettangolare in calcestruzzo armato gettato in opera. Per la realizzazione del modello architettonico viene utilizzato il software di BIM Authoring Revit 2021. Inoltre, vengono utilizzati ulteriori software e visualizzatori, in diverse versioni, per poter analizzare i risultati dell'interpretazione delle informazioni trasferite agli stessi.

Il trasferimento delle informazioni tra i software è avvenuto principalmente come collegamento diretto tra file nativi e come collegamento indiretto tramite il formato di

interscambio IFC; in alcuni casi è stato anche necessario ricorrere all'utilizzo di file di tipo DXF.

L'analisi strutturale è stata condotta con il software commerciale di analisi agli elementi finiti Jasp 7.5, seguendo dei workflow proposti in letteratura. Dall'approccio di modellazione e analisi strutturale stato possibile ottenere il modello delle armature nel formato di interscambio IFC.

I singoli modelli sviluppati strutturale, architettonico e impiantistico sono stati successivamente uniti in un unico "*modello federato*" con l'ausilio del software Navisworks di Autodesk. Con la realizzazione del modello federato è stato possibile effettuare delle verifiche di interferenze tra i modelli "*clash detection*", nonché fare considerazioni sulle caratteristiche dei singoli modelli e del modello federato.

Infine, per rendere la comunicazione visiva ancora più efficace, il modello è stato implementato con visualizzazione immersiva attraverso l'uso di Enscape.

## **ABSTRACT (EN)**

The application of the BIM (Building Information Modeling) methodology is currently experiencing strong growth in the architecture, engineering and construction (AEC) industry, also driven by national regulations which have encouraged, and in some cases also imposed, its application.

The new perspectives opened by parametric software appear as work solutions improving the efficiency of the construction project management approach. Interoperability, object-oriented modeling, technological integration, operational simultaneity, are just some of the aspects that the new design tools offer to designers.

In the first part of this thesis, some of the updated aspects of the BIM methodology are introduced, which have been subject to continuous revision in recent years. In addition, the overview of the current regulatory status regulating BIM, both nationally and internationally, is reported.

The main focus of this thesis is on the aspect of interoperability between the architectural and structural disciplines, focusing more on the exchange of information between BIM Authoring software and structural calculation software (BIM to FEM).

In addition to detailed research on the current state of the art relating to BIM to FEM interoperability, an updated overview of the international standards developed by buildingSMART for this purpose is reported, in particular: the IFC (Industry Foundation Classes) and the MVD (Model View Definitions).

Particular attention was paid to the main limits of the structural analysis within the BIM process in the codified reading between the structural elements and their investigation in the parametric processing of the relevant software.

To this end, the project of a five-storey building on a rectangular plan in reinforced concrete cast on site was proposed as a case study. The BIM Authoring Revit 2021 software is used to create the architectural model. Furthermore, additional software and viewers, in different versions, are used to analyze the results of the interpretation of the information transferred to them.

The transfer of information between software occurred mainly as a direct connection between native files and as an indirect connection via the IFC interchange format; in some cases, it was also necessary to use DXF files.

The structural analysis was conducted with the commercial finite element analysis software Jasp 7.5, following the workflows proposed in the literature. From the structural

modeling and analysis approach it was possible to obtain the reinforcement model in the IFC interchange format.

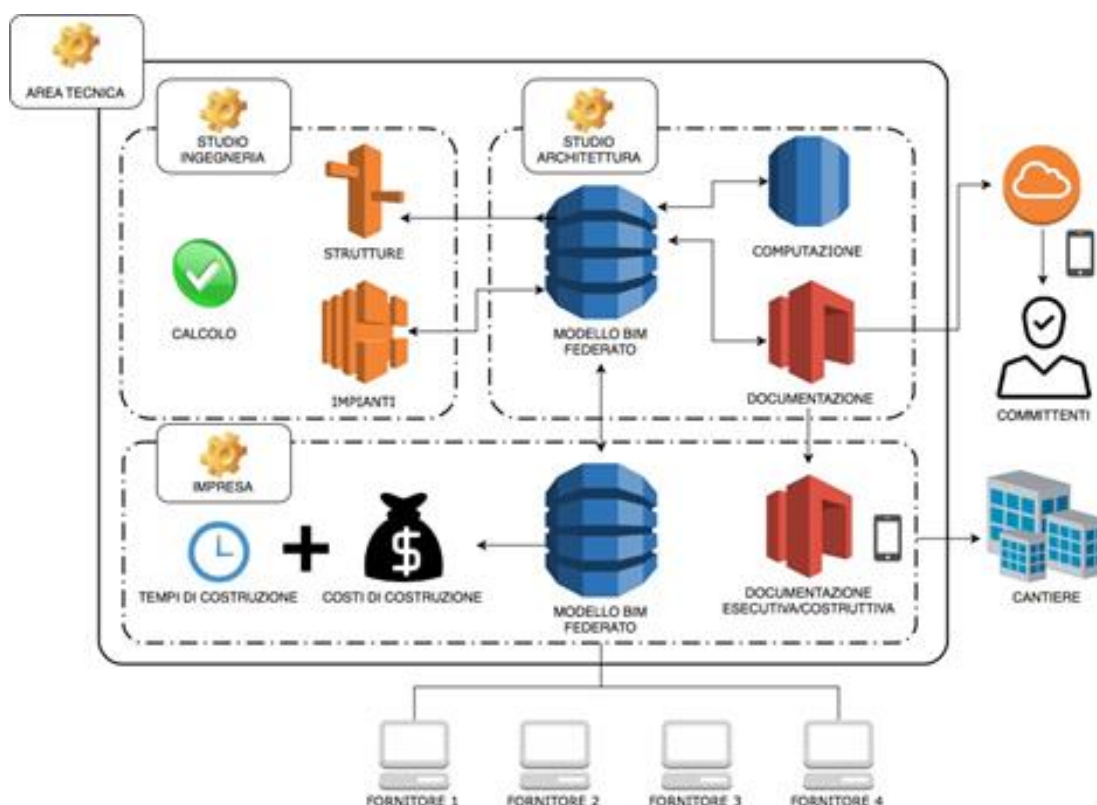
The individual structural, architectural and plant models developed were subsequently merged into a single "federated model" model with the help of Autodesk's Navisworks software. With the creation of the federated model, it was possible to carry out interference checks between the clash detection models, as well as to make considerations on the characteristics of the individual models and the federated model.

Finally, to make visual communication even more effective, the model was implemented with immersive visualization through the use of Enscape.

## 1. INTRODUZIONE

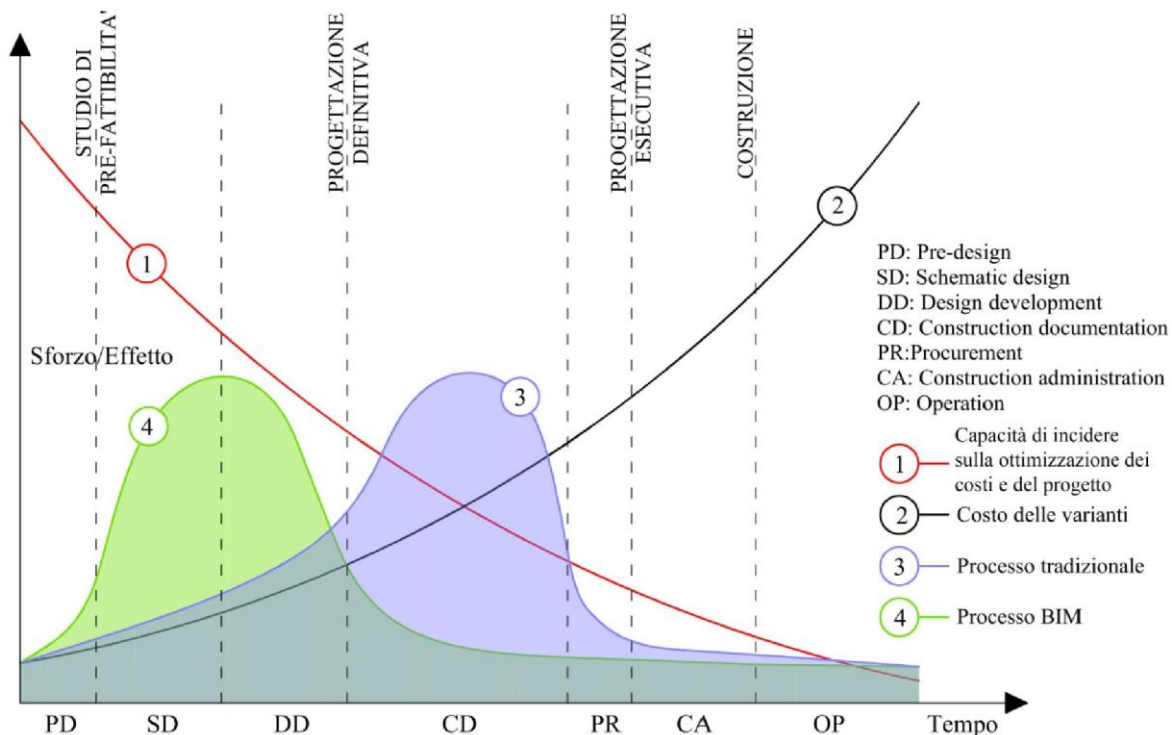
Con il termine Building Information Modeling si definisce un approccio innovativo alla progettazione, alla costruzione e alla gestione di edifici o di opere infrastrutturali, estesa all'intero ciclo di vita delle stesse. Il termine, coniato negli anni Settanta da C. Eastman e reso popolare da J. Laiserin indica “una tecnologia di modellazione collegata ad un database di informazioni di progetto”, definizione che riflette la relazione tra il modello e il database su cui si fonda.

Il BIM è emerso come una potente tecnologia per la gestione di complessi progetti di costruzione, permettendo di semplificare la comunicazione, aumentare la collaborazione e migliorare i risultati del progetto. Purtroppo, ancora oggi, il BIM viene considerato erroneamente come risorsa per le sole realtà professionali di progettazione. L'approccio processuale del BIM prevede, invece, la sua estensione all'intera filiera del processo edilizio (Figura 1.1), interessando sì i progettisti, ma anche le imprese di costruzioni, i committenti, i collaudatori, i promotori e gestori immobiliari, i fornitori, ecc....



**Figura 1.1 - Interconnessioni tra le diverse figure interessate dal processo edilizio, secondo l'approccio processuale BIM (Fonte: Fermat design. Soluzioni BIM applicate ai prefabbricatori e costruttori).**

Una declinazione delle performance offerte da un approccio BIM, in contrasto rispetto alle inefficienze prodotte da un processo progettuale tradizionale, è mostrata dalla curva di MacLeamy (Figura 1.2).



**Figura 1.2 – Curva di MacLeamy “effect/effort” (Fonte: La logica dell’anticipazione nel BIM**  
**(<https://docs.dicatechpoliba.it/filemanager/25/a,a,%202018-19/BIM/Anticipazione%20nel%20BIM.pdf>**  
**– accesso il 22/09/2023).**

La curva (1) rappresenta l’andamento dell’impatto che il processo decisionale ha sulla ottimizzazione dei costi e delle procedure. Partendo dalla fase di pre-design ha un andamento decrescente, questo sta a significare che le scelte progettuali avranno un riscontro maggiore sulla qualità del prodotto finale se effettuate nelle fasi iniziali.

La curva (2) rappresenta i costi derivanti da un’eventuale variante progettuale, che risultano essere minori se effettuata durante le prime fasi.

Un processo progettuale di tipo tradizionale, curva (3), che generalmente prevede che le modifiche al progetto siano effettuate tra la fase di progettazione definitiva e quella esecutiva, restituisce una curva con un picco delle attività di progettazione nel momento della “*construction documentation*”, dove i costi per la realizzazione delle varianti sono notevolmente più alti rispetto ai costi che le stesse avrebbero se le modifiche fossero anticipate nel tempo. L’uso di un approccio BIM, curva (4), consente proprio di anticipare le modifiche in una fase ancora flessibile del progetto, in cui i costi delle varianti al progetto stesso risultano molto ridotte, poiché si è in grado di intervenire su un progetto ancora flessibile, esplorando uno spazio di possibili soluzioni molto più ampio.

Gli aspetti fondamentali della metodologia BIM sono legati a:

- modellazione 3D: mediante l'ausilio di specifici software che consentono di creare modelli che contengono informazioni dettagliate sui vari componenti, materiali e sistemi utilizzati nel progetto;
- integrazione dei dati: poiché i modelli realizzati secondo il metodo BIM possono incorporare una vasta gamma di dati, oltre alle semplici informazioni geometriche. I modelli digitali 3D contengono informazioni sulle caratteristiche fisiche e funzionali del modello e possono anche includere anche dati relativi alla stima dei costi, alla programmazione, all'analisi energetica, alle specifiche dei materiali e ai requisiti di manutenzione;
- collaborazione, visualizzazione e condivisione delle informazioni: mediante l'utilizzo di piattaforme collaborative, le diverse parti interessate al progetto, hanno la possibilità di condividere le informazioni, consentendo un processo decisionale rapido ed ottimizzato. Il metodo BIM, inoltre, prevede che le parti interessate del progetto possano visualizzare ed esplorare l'edificio virtualmente, fornendo una migliore comprensione del progetto;
- clash detection: la metodologia BIM, attraverso gli opportuni software di progettazione che consente di eseguire il rilevamento delle interferenze, ovvero, l'identificazione dei potenziali conflitti tra diversi elementi o sistemi di costruzione. La *clash detection*, minimizzando l'errore durante l'iter progettuale, costruttivo e manutentivo, inevitabilmente minimizza anche i costi;
- gestione del ciclo di vita dell'opera: l'adozione del metodo BIM supporta l'intero ciclo di vita di un edificio, partendo dal concetto iniziale e dalla progettazione dell'opera, attraverso la costruzione e il funzionamento fino all'eventuale demolizione o rigenerazione.

L'innovazione principale della metodologia BIM consiste nella possibilità di gestire univocamente il progetto come un vero e proprio «prototipo digitale del manufatto, dal quale estrarre la documentazione necessaria durante le fasi progettuali, esecutive, di gestione»<sup>1</sup>. I documenti sono coordinati e fanno riferimento a un unico database, in modo tale che l'informazione sia sempre aggiornata e coerente. Una gestione dei dati condivisa, inoltre, riduce il rischio di errori dovuti a modifiche non debitamente segnalate ed evita la

---

<sup>1</sup> Caffi V. (2006). *Le IT per il disegno di progetto*, in Pratelli A., *Codici del disegno di progetto*, Udine, FORUM, p. 457.

perdita di informazioni utili, nei passaggi del progetto dal team di progettazione all'impresa o al committente, consentendo di aggiungere e aggiornare le informazioni in tutta la vita utile dell'opera.

Un progetto realizzato con il metodo BIM può contenere qualsiasi informazione riguardante l'opera edilizia e le sue parti componenti. Le informazioni che più comunemente vengono raccolte in un modello digitale parametrizzato riguardano la localizzazione geografica, la geometria, le relazioni spaziali, le proprietà dei materiali e degli elementi tecnici, la quantità e qualità dei componenti, comprese le specifiche tecniche fornite dai produttori, ma anche le fasi di avanzamento dei lavori e le informazioni per le operazioni di gestione e manutenzione.

### 1.1 Le dimensioni del BIM

Gli aspetti e le informazioni che entrano in gioco nel processo di digitalizzazione di una costruzione sono stati schematizzati in “dimensioni BIM”. Ad ogni dimensione corrisponde una rispettiva “potenzialità” che l'informatizzazione del progetto permette. In Italia, queste “dimensioni” sono definite dalla UNI 11337-8 ed attualmente sono 7, mentre ulteriori 3 sono in fase di dibattito per una possibile integrazione nella normativa (Figura 1.3).

Dimensioni secondo la UNI 11337							In fase di dibattito		
1D	2D	3D	4D	5D	6D	7D	8D	9D	10D
Organizzazione	Modellazione bidimensionale	Modellazione tridimensionale	Gestione temporale	Gestione economica	Ciclo di vita e manutenzione	Sostenibilità	Sicurezza	Costruzione snella	Costruzione industrializzata

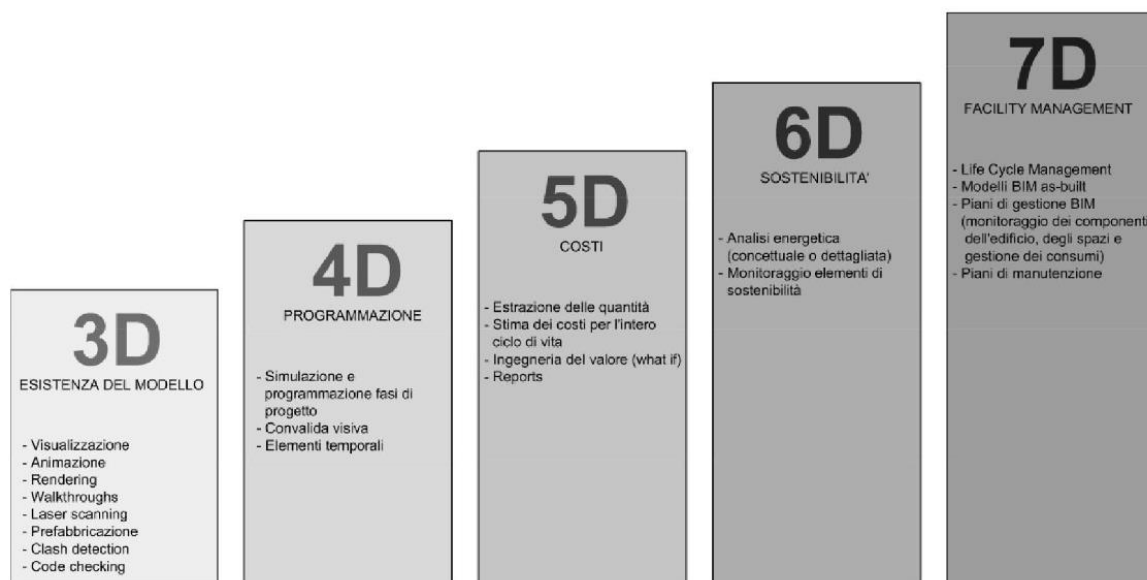
**Figura 1.3 – Dimensioni BIM.** (Fonte: Casalicchio A. *Le 10 dimensioni del BIM*. Nike360.com).

La dimensione 1D e 2D del BIM, si basano sulla trasposizione del modello su elaborati 2D (piante, sezioni, particolari, ecc.) e la dimensione 3D rappresentazione del modello nello spazio. Il 2D e il 3D sono appunto “dimensioni” che caratterizzano la modellazione geometrica di un'opera. La metodologia BIM si spinge ben oltre la semplice modellazione geometrica in 3D e abbraccia altri aspetti (o dimensioni appunto) che servono ad aggiungere informazioni utili all'opera da realizzare o da gestire. Per ogni “dimensione” si hanno livelli di informatizzazione appropriati da cui sarà possibile effettuare le analisi e i controlli che sono richiesti per la stessa dimensione BIM considerata (Figura 1.4).

Il BIM ha ampliato il concetto di mera modellazione tridimensionale dell'opera aggiungendo informazioni relative a costi, tempo di realizzazione, manutenzione,



sostenibilità, rappresentando il resto delle informazioni come ulteriori dimensioni dal 4D al 7D. La dimensione 4D riguarda la gestione dei tempi del progetto, mentre la dimensione 5D garantisce una attenta stima e analisi dei costi nel tempo. La dimensione 6D riguarda il ciclo di vita e manutenzione dell'opera, fornendo informazioni sui singoli componenti, dagli impianti tecnici alle finiture e la dimensione 7D verte sulla sostenibilità, economica, ambientale ed energetica.



**Figura 1.4 – Analisi e controlli associati alla rispettiva dimensione BIM (Fonte: BIM Dimension, <https://docs.dicitechpoliba.it/filemanager/25/a,a,%202018-19/BIM/BIM%20Dimension.pdf> – accesso il 22/09/2023).**

Riguardo le ulteriori “dimensioni”, ancora in fase di discussione e sviluppo: la dimensione 8D, aggiunge informazioni al modello relative alla sicurezza in fase di progettazione ed esecuzione dei lavori; la dimensione 9D, riguarda tutte quelle informazioni da assegnare al modello al fine di garantire una ottimizzazione delle fasi di realizzazione dell'opera nonché di una gestione efficiente delle risorse e una minimizzazione degli sprechi, mentre la 10D verte sulla volontà di industrializzare il mondo delle costruzioni per incrementare la produttività integrando le nuove tecnologie, dati fisici, commerciali o ambientali attraverso la digitalizzazione.

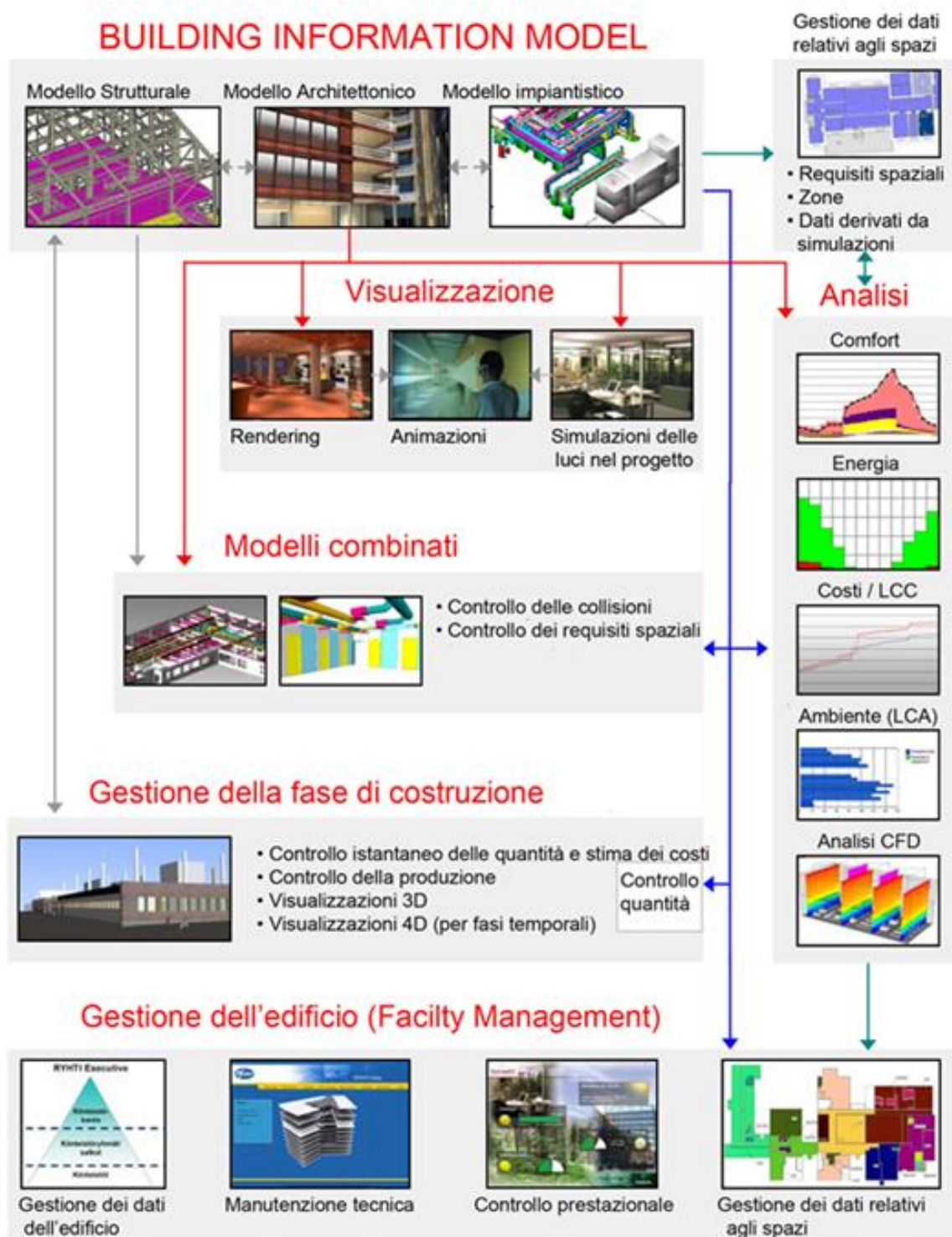
Il modello informatizzato dell'opera (o modello parametrico), sviluppato ad un determinata “dimensione” BIM, in quanto prototipo virtuale, consente di poter condurre analisi specialistiche e controlli di diverso genere (Figura 1.5). La previsione della risposta del modello reale, ottenuta a partire dal modello digitale, oltre a facilitare le attività di progetto e realizzazione, genera notevoli benefici anche per la fase di manutenzione. Valutare gli

effetti dei possibili interventi sul modello virtuale consente di definire in maniera ottimizzata quale sarà l'intervento migliore. Nello specifico il modello parametrico «può essere utilizzato per migliorare la qualità del progetto: permette di identificare per tempo conflitti tra elementi costruttivi (*clash detection*) con benefici evidenti in termini di tempi e costi in fase esecutiva. Permette di estrarre i dati utilizzabili per altre applicazioni di carattere specialistico, quali: l'analisi strutturale, l'efficienza energetica, l'abitabilità e l'agibilità, la sicurezza antincendio e di valutare la rispondenza a norme.

Un altro settore di interesse è quello della computistica del manufatto. Nello specifico, grazie al modello BIM è possibile misurare in maniera semplice e immediata le quantità caratteristiche di un elemento tecnico, ad esempio la superficie di un intonaco, i tramezzi interni, i pilastri, le travi, ma anche aree calpestabili, e superfici vetrate, ecc. Il database di progetto diventa pertanto un patrimonio informativo utile lungo tutto il ciclo di vita del manufatto, con particolare attenzione nelle operazioni di manutenzione. Questo modo di procedere, se implementato fin dall'inizio nelle prime fasi di lavoro, si riflette positivamente in termini economici, su tutto il processo di progettazione e di costruzione»<sup>2</sup>. Il modello virtuale dell'opera costruito secondo la metodologia BIM ha alla base il concetto di modellazione ad oggetti. Le analisi e i controlli che possono essere effettuate a partire dal modello BIM sono strettamente connesse al grado di evoluzione informativo degli stessi oggetti. Gli strumenti BIM (*BIM toolkit*), intesi come quell'insieme di software e applicativi informatici BIM, servono a simulare una realtà esistente o futura in ogni suo aspetto.

---

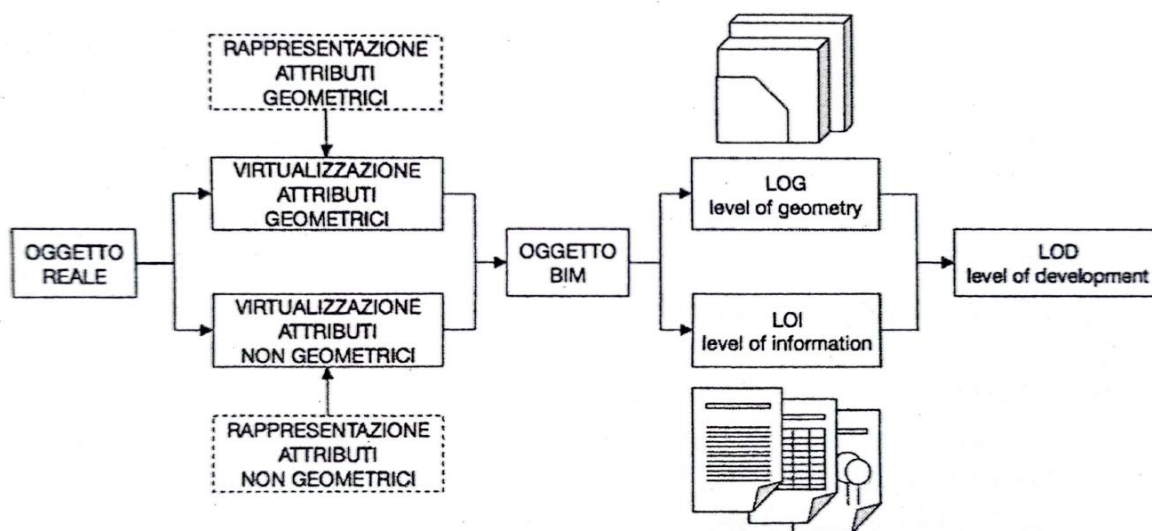
<sup>2</sup> Donato V. (2011). *Building Information Modeling (BIM): analisi applicata al centro affari di Arezzo*.



**Figura 1.5 – Interconnessioni tra il modello BIM ed i possibili controlli ed analisi su modello digitale.**  
 (Fonte: Zacchei V. (2011). Building information model (BIM). Teknoring.com).

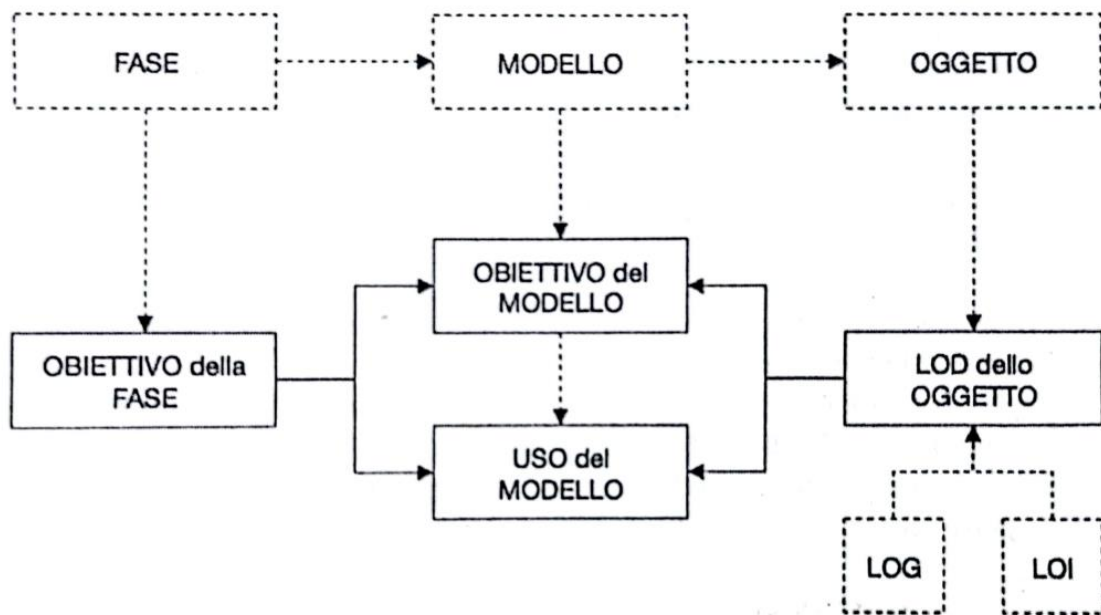
## 1.2 Sviluppo degli oggetti BIM: Level of Development (LOD)

Il grado di evoluzione informativo di un oggetto del modello BIM è internazionalmente definito attraverso i LOD (Level of Development), ovvero i “livelli di sviluppo”. Il LOD rappresenta l’insieme del livello di dettaglio degli attributi geometrici, LOG (Level of Geometry), e del livello di dettaglio degli attributi non geometrici, LOI (Level of Information) (Figura 1.6).



**Figura 1.6 – LOD, LOG e LOI per gli oggetti digitali BIM (rielaborazione UNI 11337-4:2017) (Fonte: Pavan A. et Al., (2022), BIM: Metodi e strumenti. Progettare, costruire e gestire nell’era digitale, Tecniche Nuove).**

Il concetto di LOD è legato all’oggetto e non al modello. In un modello BIM possono anche coesistere oggetti con LOD differenti, a seconda degli obiettivi e usi del modello stesso. Un modello BIM di un’opera potrà comporsi di oggetti con diversi LOD (divisi per categorie, disciplina, gruppi funzionali), partendo dalla definizione degli obiettivi e usi del modello stesso (Figura 1.7).



**Figura 1.7 – Evoluzione informativa nel processo digitale (rielaborazione UNI 11337-4:2017) (Fonte: Pavan A. et Al., (2022), BIM: Metodi e strumenti. Progettare, costruire e gestire nell’era digitale, Tecniche Nuove).**

La definizione dei LOD degli oggetti è standardizzata. A livello internazionale, i sistemi di definizione dei LOD sono due: uno statunitense LOD (Level of Development) definito dall’organizzazione BIM Forum; l’altro britannico, del BIM Task Group, LOD (Level of Definition), che fa riferimento alla norma PAS 1192-2:2014 (BSI).

In Italia, con la norma UNI 11337-4:2017 la definizione dei LOD, pur mantenendo la stessa accezione definita dai documenti internazionali, assume una classificazione differente. La norma italiana, per categorizzare i Livelli di Dettaglio (LOD), utilizza una classificazione con una scala alfabetica, da LOD A a LOD G (Tabella 1).

Per ogni LOD la norma specifica le informazioni che devono essere incluse nell’elemento, ovvero le sue caratteristiche quantitative, qualitative e di visualizzazione.

Per quanto riguarda il Livello di Sviluppo degli oggetti, la norma UNI definisce varie scale in base all’ambito operativo del progetto:

- scala generale di LOD (per edifici ed interventi di nuova costruzione);
- scala di LOD per interventi di restauro;
- scala di LOD per interventi territoriali e infrastrutture;
- scala di LOD per mezzi e attrezzature.

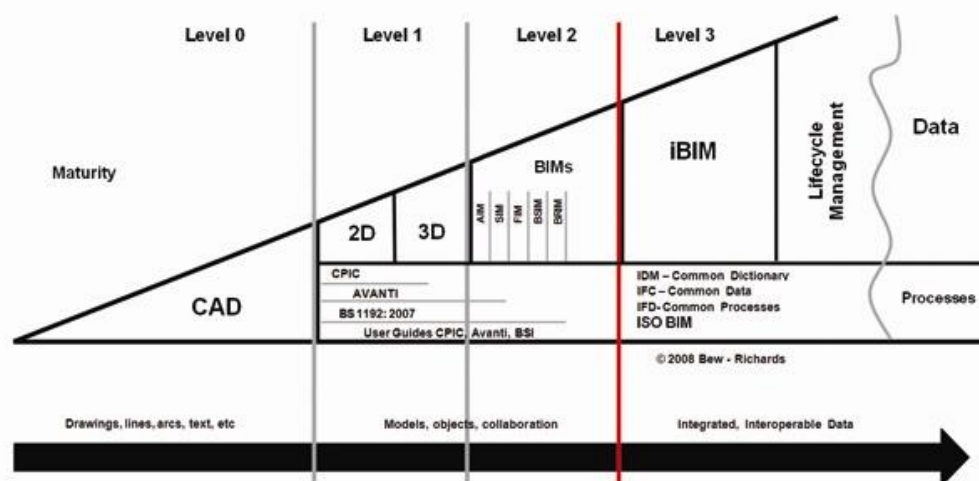
Un determinato livello di sviluppo degli oggetti, oltre che necessario per il raggiungimento degli obiettivi del modello BIM (es. analisi strutturali, energetiche, visualizzazione, cantierizzazione, ecc.) può essere anche richiesto dal committente nel capitolato informativo o essere concordato tra committente e impresa attraverso il piano di gestione informatica (pGI).

LoD USA	LoD UK	LoD Ita
LOD 100 - Concept	LOD 1 - Preparation and Brief	LOD A - oggetto <b>SIMBOLICO</b>
LOD 200 - Design Development	LOD 2 - Concept	LOD B - oggetto <b>GENERICO</b>
LOD 300 - Documentation	LOD 3 - Developed Design	LOD C - oggetto <b>DEFINITO</b>
LOD 350 - Construction	LOD 4 - Technical Design	LOD D - oggetto <b>DETTAGLIATO</b>
LOD 400 - Construction	LOD 5 - Construction	LOD E - oggetto <b>SPECIFICO</b>
LOD 500 - Facilities	LOD 6 - Handover	LOD F - oggetto <b>ESEGUITO</b>
	LOD 7 - Maintenance	LOD G - oggetto <b>AGGIORNATO</b>

**Tabella 1 – Definizione LOD secondo i diversi standard nazionali e internazionali (Fonte: 4<sup>m</sup>group).**

### 1.3 Livelli di maturità del BIM

Nello standard britannico (PAS 1192-2) è stato definito un percorso graduale, diviso in quattro livelli, per rappresentare la transizione verso l'interoperabilità del settore AEC. Questi livelli, che prendono il nome di livelli di maturità BIM, vanno dal livello 0 al livello 3, livello più alto raggiungibile, anche se in futuro non è escluso che possano essere aggiunti ulteriori livelli. Questo passaggio graduale è stato successivamente rappresentato graficamente in un apposito diagramma, conosciuto come cuneo di Bew-Richards (Figura 1.8).



**Figura 1.8 - Cuneo di Bew-Richards (Fonte: Sacks, R., et al., (2018), A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors).**

Nel livello 0 il progetto non prevede alcuna forma di collaborazione e si fa uso di tecniche di disegno CAD 2D e trasmissione dei dati principalmente cartacea. Il livello 1 prevede l'utilizzo del CAD 3D, per lavori concettuali, e del disegno 2D, per la generazione della documentazione di approvazione legale e delle informazioni sulla produzione. A questo livello, la condivisione dei dati, tra le parti e il committente, avviene elettronicamente utilizzando il Common Data Environment (CDE) (ACDat secondo la norma italiana UNI 11337). La collaborazione tra le diverse parti interessate, che gestiscono singolarmente i propri dati, però risulta nulla o scarsa. Questo livello prevede comunque: la delineazione di ruoli e responsabilità per le parti interessate; la convenzione di "file naming" standardizzata e la creazione di codici specifici del progetto; un sistema di condivisione elettronico dei documenti comune per tutte le parti interessate; la definizione di una gerarchia di informazioni appropriata per il CDE e per l'archiviazione dei documenti. Al livello 2 viene incentivato il lavoro collaborativo, fornendo a ciascuna delle parti interessate il proprio modello 3D ed è previsto uno scambio di informazioni ottimizzato e un coordinamento continuo tra tutti gli attori in gioco. Le informazioni dei diversi modelli 3D locali vengono scambiate tra le parti per mezzo di un unico formato di file, consentendo la combinazione dei diversi dati per la creazione di un modello BIM federato<sup>3</sup>.

Per il raggiungimento del livello 2 è necessario: rispettare le linee guida prescritte per il Livello 1 con indicazione di utilizzare software che supportino formati di file comuni (IFC o COBie); estendere il modello a dimensioni superiori rispetto a quelle spaziali (4D, 5D); prevedere una totale interoperabilità nel flusso di lavoro, tra tutte le parti interessate.

Il livello 3, definito "iBIM", prevede una collaborazione più spinta, attraverso un unico modello condiviso archiviato in un repository centrale e basato su cloud, così da consentire a tutte le parti interessate di lavorare contemporaneamente sullo stesso modello, ottenendo aggiornamenti in tempo reale. Per l'implementazione di questo livello ad un dato progetto è richiesto: lo sviluppo di un nuovo standard "Open Data", che faciliti la condivisione dei dati in tutto il mondo e la creazione di nuovi framework per progetti basati sul BIM. Il livello di maturità 3 pone maggiore attenzione alla gestione del ciclo di vita dell'opera, facendo riferimento anche a costi e emissioni di CO<sub>2</sub>, l'utilizzo di dati in tempo reale, le connessioni previste dalle tecnologie Internet of things (IoT) e Smart Grids, lo sviluppo

---

<sup>3</sup> Per modello federato (*federated model* o *merged model*) si intende l'insieme dei modelli 3D relativi alle specifiche discipline (architettónica, strutturale, MEP, ecc.), che si vanno ad integrare in un unico modello digitale, con l'utilità di poter confrontare le diverse informazioni e gestirle contemporaneamente.



delle Smart Cities (Figura 1.9).

I livelli di maturità, introdotti delle norme britanniche, oggi sono stati presi come riferimento da tutto il mondo (Figura 1.10), modificandone la propria suddivisione ma mantenendo gli stessi concetti introdotti inizialmente dalle PAS 1192.

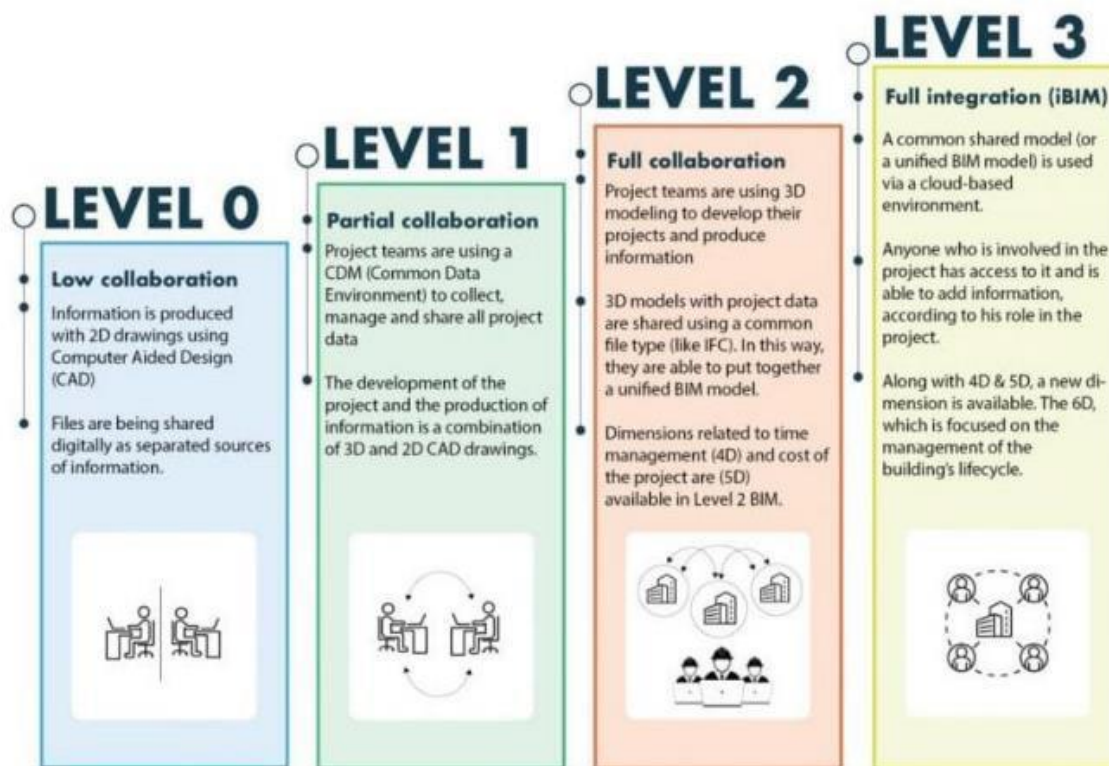


Figura 1.9 - Caratteristiche dei livelli di maturità del BIM (Fonte: Vaghi, F. (2021), Customized BIM Adoption & Implementation Path and Digitalization of the Certification Exam for BIM Experts)

PAS 1192 - UK	UNI 11337 - ITA	ISO 19650
Introduce 4 livelli di maturità	Introduce 5 livelli di maturità	Introduce 3 stadi di maturità
<ul style="list-style-type: none"> <li>L0 – 2D CAD</li> <li>L1 – 2D/3D CAD</li> <li>L2 – 3D BIM</li> <li>L3 – 3D BIM FM</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>L0 – non digitale</li> <li>L1 – base</li> <li>L2 – elementare</li> <li>L3 – avanzato</li> <li>L4 – ottimale</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Stage 1</li> <li>Stage 2</li> <li>Stage 3</li> </ul>

Figura 1.10 – Confronto tra i livelli di maturità BIM delle norme britanniche, italiane e internazionali (Fonte: [www.bim.acca.it](http://www.bim.acca.it), (2022), I livelli di maturità BIM: BIM level 3)



## 1.4 Il BIM nel contesto internazionale e nazionale

I dati relativi all'adozione della metodologia BIM nel mondo sono disponibili nel documento "Accelerating Digital Transformation Through BIM", uno studio realizzato nel 2021 da Dodge Construction Networks in collaborazione con Autodesk per analizzare come il BIM si stia sviluppando nel Mondo (Figura 1.11). Dodge Data & Analytics studia il BIM a livello globale Industria AEC<sup>4</sup> dal 2009 ad oggi, e rileva che nel corso di questo periodo l'adozione del BIM è aumentata in modo significativo e sta accelerando.

	Very Long 2008 or Earlier	Long 2009 to 2012	Medium 2013 to 2015	Recent 2016 to 2017	Very Recent 2018 or Later
North America	19%	27%	20%	17%	17%
AU/NZ	3%	10%	23%	29%	35%
UK/Ireland	6%	8%	26%	25%	35%
France	6%	6%	19%	28%	41%
Germany	6%	4%	16%	28%	46%
Japan	2%	4%	18%	16%	60%
Scandinavia	3%	8%	8%	23%	58%

**Figura 1.11 - Cronologia dell'adozione del BIM per paese. (Fonte: Accelerating Digital Transformation Through BIM. Dodge Data & Analytics, 2021).**

Da questi dati, è possibile osservare che il BIM ha avuto un buon inizio in Nord America con quasi la metà (46%) degli attuali utenti che ne hanno segnalato l'adozione nel 2012 o prima. Australia/Nuova Zelanda, Regno Unito/Irlanda, Francia e Germania mostrano aumenti significativi nell'adozione del BIM a partire dal 2013 e da allora sono cresciuti costantemente. Giappone e Scandinavia mostrano le impennate più recenti.

L'incremento dell'adozione del BIM è stato anche il seguito delle leggi nazionali di ogni paese. Nel Regno Unito, l'obbligo è scattato dal 2016 e ad oggi sono tra i Paesi più avanzati. Anche la Germania ha dato rilievo all'importanza del BIM e nel 2020 hanno inserito l'obbligo del BIM come nuovo standard per le costruzioni, senza periodi di transizione. In Russia, tale metodologia, è obbligatoria dal 2018 per tutti i progetti finanziati dallo Stato. In Australia hanno istituito l'obbligo per Regioni, soprattutto per

<sup>4</sup> Architecture, Engineering and Construction (AEC).

quanto riguarda il settore delle Infrastrutture. Anche il Giappone sta finanziando risorse in questa direzione, effettuando una riforma nella modalità di lavoro e investendo cospicuamente per sviluppare librerie BIM. In Francia, non vi è obbligo ma le aziende di costruzione stanno autonomamente spingendo per tale approccio.<sup>5</sup> L'UE, con la direttiva del 2014 sugli appalti, incoraggia gli enti pubblici a utilizzare il BIM negli appalti per i progetti di costruzione.

Tra le statistiche proposte nel documento "Accelerating Digital Transformation Through BIM" è possibile osservare che, in generale, le aziende più importanti hanno adottato il BIM prima, mentre le aziende più piccole costituiscono la maggioranza di coloro che lo hanno adottato più di recente. L'attuale ondata di adozione del BIM da parte delle organizzazioni identificabili nella piccola e media impresa costituisce una chiara indicazione del fatto che il BIM sta diventando ampiamente accettato come standard di settore nell'intera progettazione e settore edile.<sup>6</sup>

Sebbene l'adozione del BIM sia aumentata costantemente in tutto il settore, si evince che gli Architetti siano stati tra i primi ad avere una maggiore applicazione la metodologia BIM nei loro progetti, e da allora abbiano mantenuto un modello di crescita costante. Anche gli appaltatori hanno mostrato una notevole crescita nell'adozione del BIM, risultato che riflette il modo in cui i modelli hanno generato un valore crescente per il coordinamento, la programmazione, la prefabbricazione e altre attività di consegna dei progetti, e che stanno ora diventando strumenti tradizionali per tali realtà. Circa il 70% degli ingegneri ha adottato il BIM dal 2016. Il salto particolarmente significativo da parte degli ingegneri civili nel periodo più recente riflette l'uso in rapida crescita del BIM per i lavori infrastrutturali (Figura 1.12).<sup>6</sup>

---

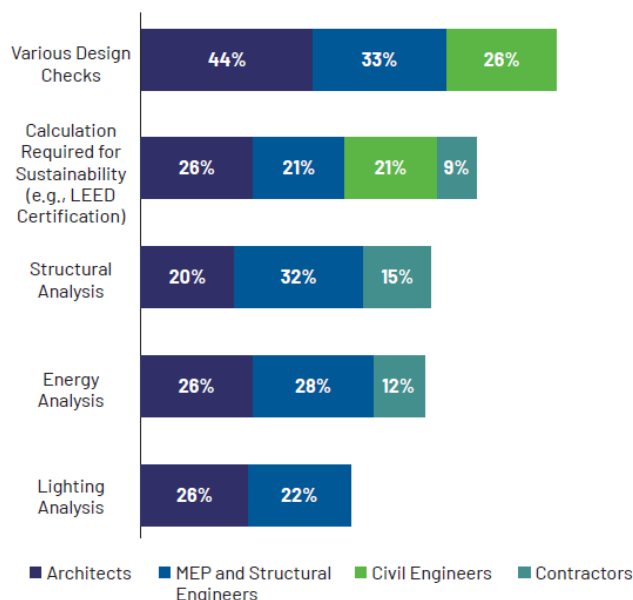
<sup>5</sup> Di Giacomo E., Lo stato dell'arte del BIM nel mondo – Obblighi e Standards accelerando l'adozione della digitalizzazione, BIM Conference 2021.

<sup>6</sup> Accelerating Digital Transformation Through BIM, SmartMarket Report. Dodge Data & Analytics, (2021).

	Very Long 2008 or Earlier	Long 2009 to 2012	Medium 2013 to 2015	Recent 2016 to 2017	Very Recent 2018 or Later
Architects	14%	17%	20%	20%	28%
Contractors	4%	15%	19%	22%	38%
MEP and Structural Engineers	6%	8%	17%	34%	39%
Civil Engineers	5%	5%	19%	30%	41%

**Figura 1.12 - Cronologia dell'adozione del BIM per tipo di azienda (Fonte: Accelerating Digital Transformation Through BIM. Dodge Data & Analytics, 2021).**

Per quanto riguarda le attività di progettazione, nonostante architetti e ingegneri siano tra le figure più coinvolte in questa categoria di attività (Figura 1.13), è interessante notare che anche alcuni appaltatori stanno effettuando analisi energetiche (12%) e strutturali (15%). In generale, le attività più frequenti nell'utilizzo del BIM sono quelle legate alle verifiche della progettazione (*Clash Detection* e *Code Checking*), alle analisi richieste per la sostenibilità (*LEED Certification*) e alle analisi strutturali. Tutte le figure sono impegnate in calcoli di sostenibilità, compresi gli ingegneri civili (21%) e alcuni appaltatori (9%).

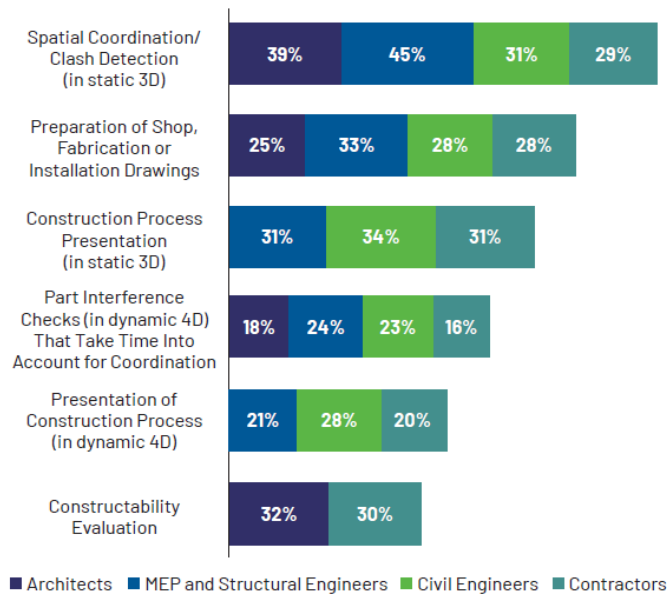


**Figura 1.13 – Analisi delle attività di progettazione, per tipo di azienda (Fonte: Accelerating Digital Transformation Through. Dodge Data & Analytics, 2021).**

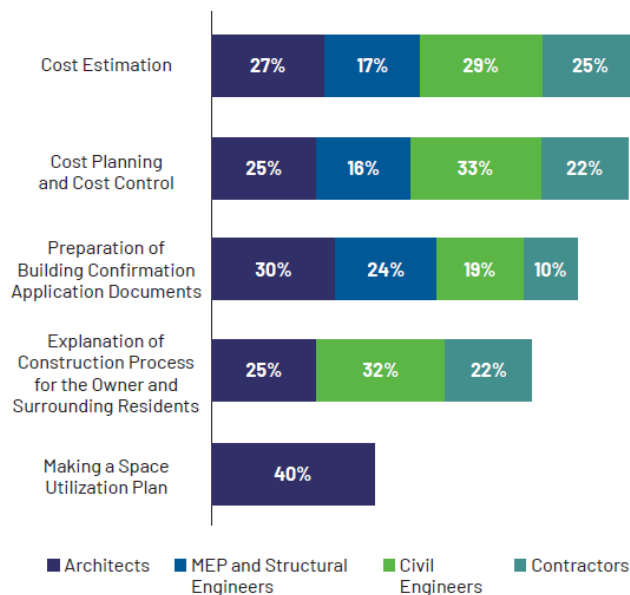
L'utilizzo prevalente del BIM per le attività connesse all'edilizia e il cantiere edile, è legato principalmente alla visualizzazione 3D e alla coordinazione spaziale, nonché alla

valutazione della costruibilità. L'uso del 4D dinamico, se pur di minore utilizzo, si presenta con percentuali soddisfacenti, suggerendo che si tratta di un motore chiave dell'innovazione per questo settore (Figura 1.14).

L'utilizzo di tale approccio per le attività connesse alla pianificazione, è legato principalmente alla stima, alla pianificazione e al controllo dei costi, utilizzati dal numero totale più elevato di aziende. Il 40% degli architetti utilizza il BIM per realizzare piani di utilizzo dello spazio, e risulta essere secondo soltanto alle verifiche di progettazione (44%) tra tutte le attività che gli architetti riferiscono di svolgere (Figura 1.15).<sup>6</sup>



**Figura 1.14 – Analisi di attività connesse all’edilizia, per tipo di azienda (Fonte: Accelerating Digital Transformation Through BIM. Dodge Data & Analytics, 2021).**

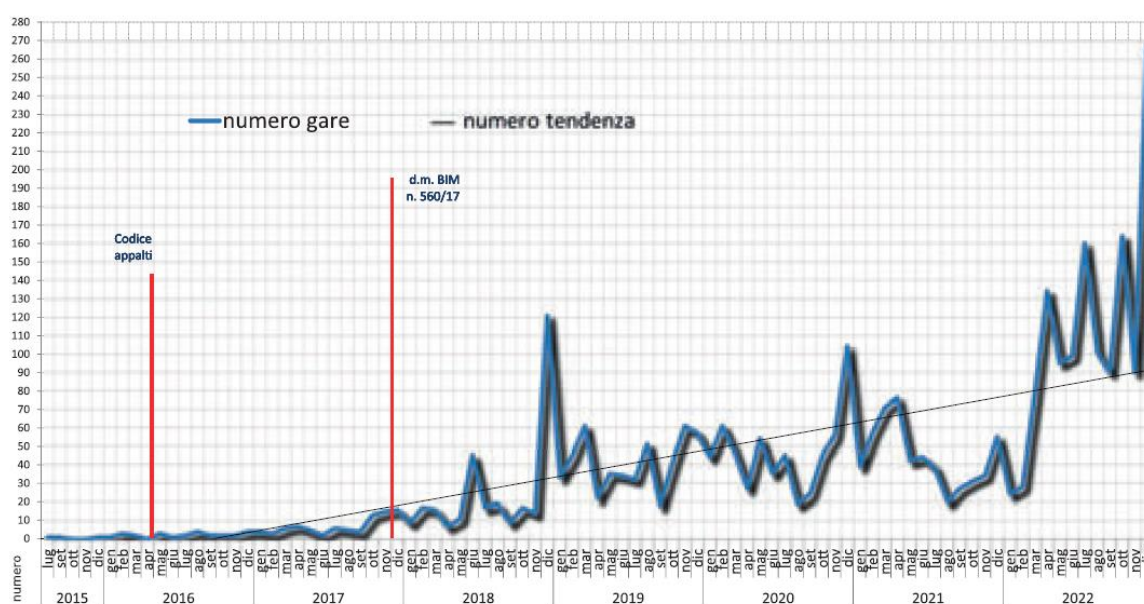


**Figura 1.15 - Analisi di attività connesse alla pianificazione, per tipo di azienda (Fonte: Accelerating Digital Transformation Through BIM. Dodge Data & Analytics, 2021).**

Anche in Italia, principalmente negli ultimi anni, si evidenzia una forte crescita nell'adozione della metodologia BIM nell'Industria AEC. I dati relativi a questa crescita sono disponibili nel report analitico 2023, relativo ai dati collezionati nel 2022, prodotto dall'OICE<sup>7</sup>, che riguarda le gare pubbliche di affidamento di servizi di architettura e di ingegneria (S.A.I.) che prevedono l'utilizzo delle metodologie BIM, per la progettazione.

A partire dal 2015, l'OICE ha rilevato una continua crescita nelle gare pubbliche di affidamento S.A.I. che prevedono l'adozione di metodologie BIM, riscontrando una crescita sempre più consistente, soprattutto dopo l'approvazione del codice dei contratti pubblici del 2016, il quale, nell'articolo 23 comma 13, enuncia la graduale adozione della metodologia Building Information Modeling, e dall'entrata in vigore del DM n. 560 del 2017 (Figura 1.16). Con il decreto n. 560 del 2017, vengono stabilite le modalità e i tempi di progressiva introduzione dei metodi e degli strumenti elettronici di modellazione per l'edilizia e le infrastrutture, è entrato in vigore dal 27 gennaio 2018.

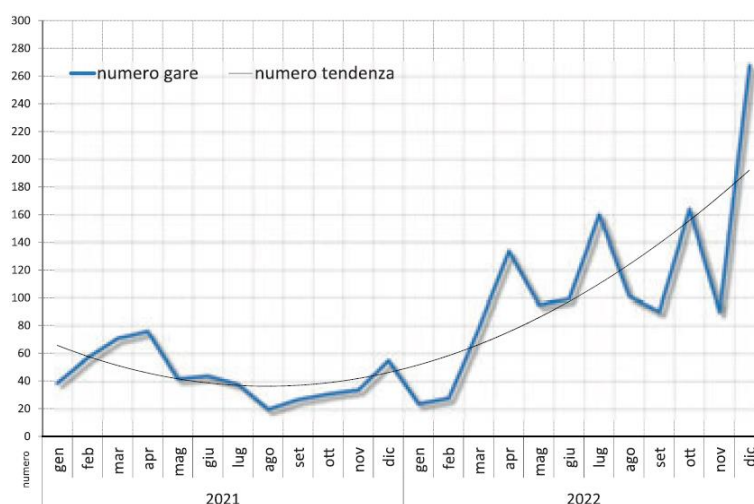
«Nel 2022 il numero delle gare per S.A.I. che richiedono l'uso della metodologia BIM è aumentato dell'87,8% rispetto all'anno 2021, sono state infatti pubblicate infatti 1.003 gare, contro le 534 del 2021»<sup>8</sup> (Figura 1.17).



**Figura 1.16 – Andamento numero di tutti i bandi BIM (2015-2022) (Fonte: Report OICE BIM 2023).**

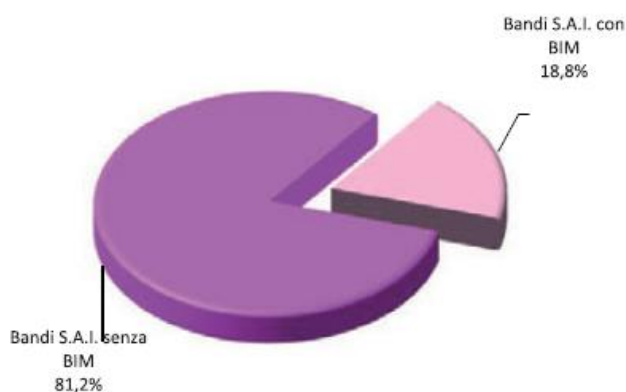
<sup>7</sup> Associazione delle Organizzazioni di Ingegneria e Consulenza Tecnico Economica (OICE).

<sup>8</sup> Fonte dati: Report OICE BIM 2023



**Figura 1.17 – Andamento numero bandi BIM (2020-2022) (Fonte: Report OICE BIM 2023).**

«Il rapporto tra il numero dei bandi per S.A.I. con richiesta di BIM e il totale del mercato dei S.A.I. nel 2022 è pari al 18,8% (Figura 1.18), nel 2021 era stato solo il 9,0%. Se si sposta l'attenzione sul valore di questi bandi, si può notare che nel 2022 i bandi S.A.I. con richiesta di BIM raccolgono 2.103,0 milioni di euro, contro i 4.421 milioni di tutto il mercato S.A.I., e rappresentano il 47,6% del valore totale. Il confronto con il 2021 vede il valore dei bandi S.A.I. per BIM aumentare del 484,3%, passando da 360 milioni nel 2021 a 2.103 milioni nel 2022.»<sup>8</sup>



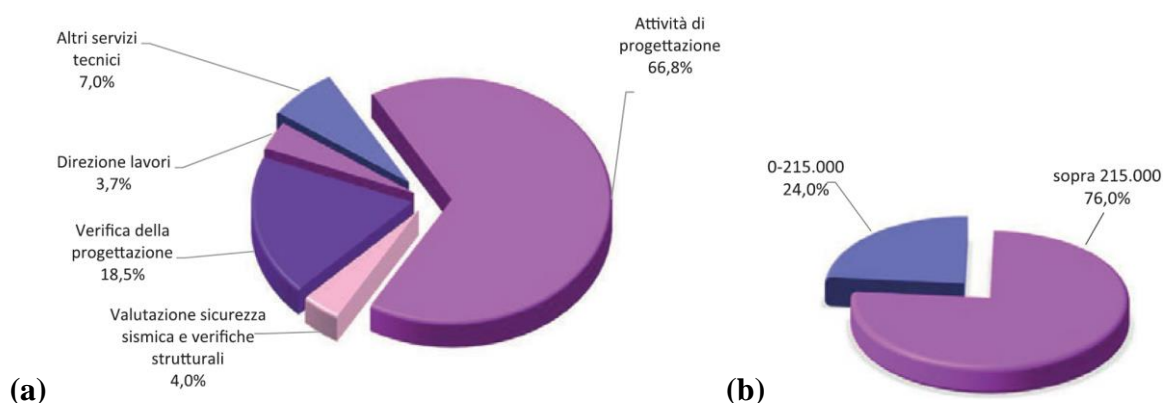
**Figura 1.18 - Numero bandi BIM sul totale di bandi per S.A.I. nel 2022 (Fonte: Report OICE BIM 2023).**

Dal rapporto OICE si evince che il numero dei bandi BIM per le attività di progettazione pubblicati nel 2022 è cresciuto del 48,2% rispetto al 2021, di cui si ha un forte incremento nelle attività di Valutazione sicurezza sismica e verifiche strutturali (+1233,3%).

Nel 2022, i bandi S.A.I. che includono la metodologia BIM sono così divisi: l'attività di progettazione, con 670 bandi, rappresenta il 66,8% del totale; i servizi di verifica della progettazione, con 186 bandi, sono il 18,5%; le valutazioni della sicurezza sismica e le verifiche strutturali, con 40 bandi, sono il 4,0%; i bandi per direzione dei lavori sono 37 e

arrivano al 3,7%; gli altri servizi tecnici, con 70 bandi, rappresentano il 7,0% del totale (Figura 1.19 a). Il rapporto evidenzia anche che, l’apporto principale del numero di bandi S.A.I., che includono la metodologia BIM, venga dalle procedure di importo superiore alla soglia UE di 215.000 euro (dal 1° gennaio 2022 la soglia è a 215.000 euro) che sono 762, ovvero il 76,0% del totale. Mentre i bandi di importo inferiore alla soglia dei 215.000 euro sono 24, con una percentuale sul totale pari al 24,0% (Figura 1.19 b).

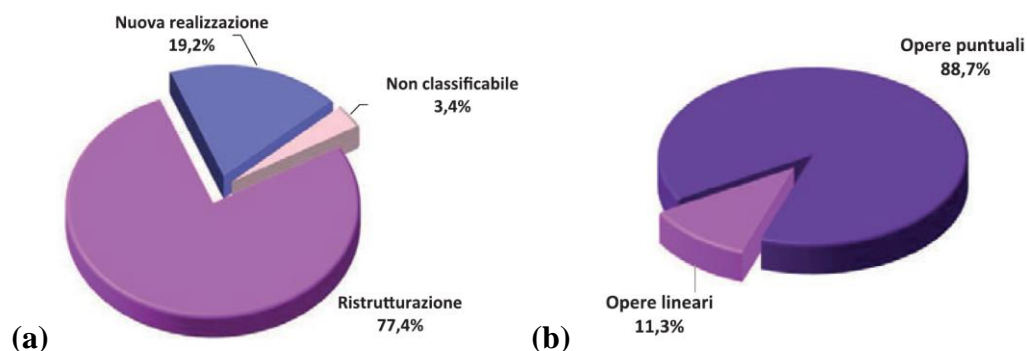
Nella suddivisione per tipologia di intervento dei bandi BIM rilevati nel 2022, si osserva una alla crescita, già riscontrata negli anni precedenti, degli interventi di ristrutturazione e risanamento del patrimonio infrastrutturale esistente, con 776 bandi (77,4% del totale), invece, i bandi per nuove realizzazioni rappresentano una quota minore, con 193 bandi (19,2% del totale) (Figura 1.20 a). Il 3,4% del totale rappresenta i bandi BIM per S.A.I. che non rientra in queste due categorie, bandi definiti “non classificabili” (verifiche di vulnerabilità sismica e della sicurezza strutturale, rilievi per restituzione in BIM).<sup>8</sup>



**Figura 1.19 – (a) Percentuale bandi BIM per attività, affidate nel 2022. (b) Percentuale bandi BIM per classi di importo, affidate nel 2022 (Fonte: Report OICE BIM 2023).**

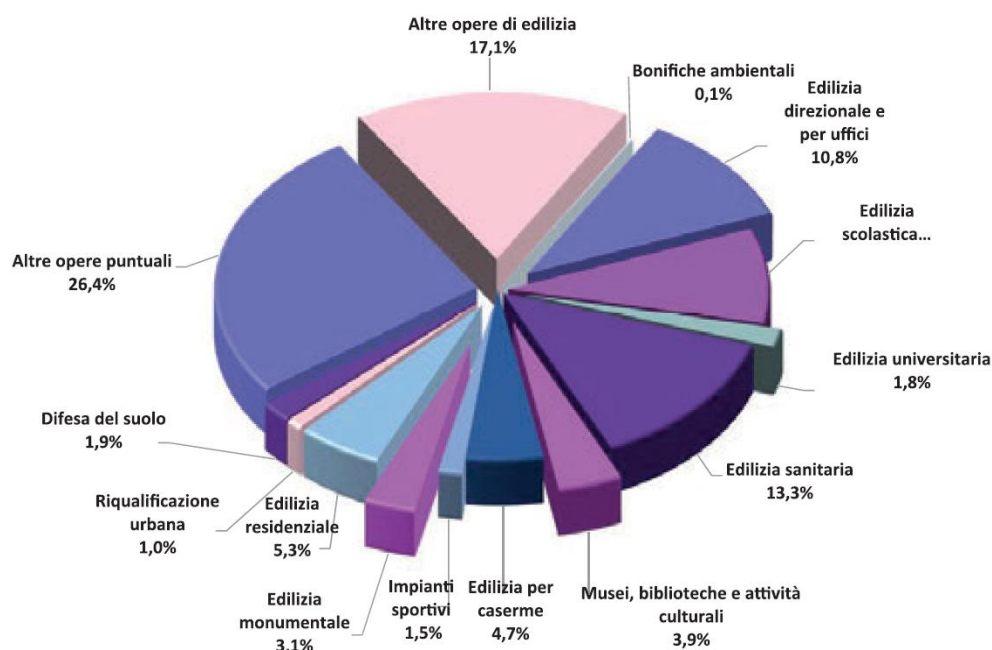
Un’ulteriore classificazione è stata fatta in base alle tipologie di opere oggetto dei bandi BIM, distinguendo fra opere lineari e opere puntuali. Dai dati raccolti si rileva che, nel 2022, l’utilizzo del BIM sia richiesto nella gran parte dei casi per interventi per opere puntuali, con 88,7% del totale, invece, le opere lineari rappresentano una quota del’11,3% del totale (Figura 1.20 b).





**Figura 1.20 – (a) Percentuale bandi BIM per tipologia di intervento nel 2022; (b) Percentuale bandi BIM per tipologia di opera nel 2022 (Fonte: Report OICE BIM 2023).**

Considerando i soli 890 bandi delle opere puntuali del 2022, da una distinzione per tipologia di opera, si rileva che il maggior numero ha riguardato i bandi per interventi nel campo dell'edilizia sanitaria, dato in linea con l'emergenza sanitaria che abbiamo vissuto negli anni precedenti, pari al 13,3% del totale. A seguire si trovano interventi per opere di edilizia direzionale e uffici (10,8% del totale), opere di edilizia scolastica (9,1% del totale) e musei, biblioteche e attività culturali (3,9% del totale) (Figura 1.21).



**Figura 1.21 – Percentuale di dettaglio dei bandi BIM per opere puntuali, nel 2022 (Fonte: Report OICE BIM 2023).**

## 1.5 Il BIM nel Nuovo Codice degli Appalti (d.lgs.36/2023)

Con l'entrata in vigore del Nuovo Codice degli Appalti (d.lgs. 36/2023), entrato in vigore il 1° aprile 2023, si va a confermare l'impostazione di introduzione graduale, già presente nel vecchio Codice degli Appalti (modificata dal dm 312/2021), obbligando a procedere con



modalità BIM per tutti gli appalti superiori a 1 milione di euro a decorrere dal primo gennaio 2025. Le disposizioni del Nuovo Codice degli Appalti (o Codice dei Contratti Pubblici) decorrono dal 1° luglio 2023, salvo per procedimenti “in corso”, abrogando le disposizioni del precedente d.lgs. 18 aprile 2016, n. 50 (Codice dei Contratti Pubblici attualmente vigente) dal 1° luglio 2023.

Gli articoli 41 e 43 del Nuovo Codice contengono elementi di novità sulla terminologia utilizzata per individuare la metodologia BIM, come già intrapreso col DM 312/2021. In particolare, i “metodi e strumenti di gestione informativa digitale delle costruzioni” vanno a sostituire i “metodi e strumenti elettronici specifici quali quelli di modellazione per l’edilizia e le infrastrutture”.

«L’articolo 43, comma 1, del Nuovo Codice precisa che la disposizione relativa all’adozione del BIM, non si applica per interventi di manutenzione ordinaria e manutenzione straordinaria, ad eccezione del caso in cui la manutenzione riguarda “opere precedentemente eseguite con l’uso di metodi e strumenti di gestione informativa digitale” (aggiornamento dei modelli e degli asset informativi, laddove essi sono stati adottati in precedenza).

Secondo l’articolo 43, comma 2, del Nuovo Codice dei Contratti Pubblici, anche al di fuori dei casi di obbligatorietà è consentito l’uso facoltativo del BIM, con la possibilità di prevedere “eventualmente” nella documentazione di gara un punteggio premiale relativo alle modalità di uso dei metodi e strumenti di gestione informativa. Questo aspetto, già presente nel D.M. 312/2021, ha la finalità di incentivazione all’uso del BIM.

L’uso facoltativo deve comunque avvenire in conformità con i principi di cui all’articolo 19, ossia i principi e i diritti digitali, ed è inoltre subordinata all’adozione delle misure stabilite nell’Allegato I.9 al Nuovo Codice, intitolato “Metodi e strumenti di gestione informativa digitale delle costruzioni.»<sup>9</sup>

«Nel Nuovo Codice, nell’allegato I.9 comma 12, è contenuta l’elencazione di requisiti e proposte relativi a usi specifici, metodologie operative, processi organizzativi e soluzioni tecnologiche, oggetto di valutazioni ai fini premiali. Nell’Allegato I.9 vengono definiti inoltre le modalità e i termini di adozione dei metodi e strumenti di gestione informativa digitale delle costruzioni. Queste modalità riguardano l’affidamento e l’esecuzione dei contratti pubblici: di lavori, servizi e forniture e per la manutenzione e la gestione

---

<sup>9</sup> Rota A., Versolato A., (2023) Nuovo Codice dei Contratti Pubblici: inquadramento e principi generali su digitalizzazione e BIM, Rivista tecnica Digitale: Ingenio-web.it, (<https://www.ingenio-web.it/articoli/nuovo-codice-dei-contratti-pubblici-inquadramento-e-principi-generalis-su-digitalizzazione-e-bim/>).

dell'intero ciclo di vita del cespite immobiliare o infrastrutturale, fino alla sua dismissione.»<sup>9</sup>

### **1.6 Standard internazionali e normative tecniche di riferimento**

Negli ultimi anni, l'interesse dell'applicazione del BIM nel settore delle costruzioni è cresciuto costantemente grazie ai significativi vantaggi che offre in termini di risparmio sui costi, maggiore efficienza, riduzione delle rilavorazioni, maggiore collaborazione, oltre che da una induzione prodotta dalle diverse norme nazionali.

Tuttavia, come si è potuto rilevare dalle statistiche oggi disponibili, riferendoci alla scala mondiale, la metodologia BIM ha un uso e una diffusione eterogenea nei diversi Paesi. La sua adozione parte dalla disponibilità, da parte di alcuni stati, di linee guida, normative, standard e report di riferimento. Come guida a questo tipo di diffusione così eterogeneo si pone l'attività di buildingSMART International (bSI), che rappresenta l'autorità internazionale per una serie di standard noti come Industry Foundation Class (IFC) che trattano la gestione di processi, dati, termini e modifiche per le specifiche, la gestione e l'utilizzo efficace delle risorse nel settore delle risorse edilizie. BuildingSMART guida allo sviluppo e all'uso attivo di standard aperti, applicazioni, procedure di formazione e certificazione riconosciuti a livello internazionale. Tutto ciò contribuisce a supportare una sempre più ampia adozione del Building Information Modeling (BIM) da parte di proprietari, operatori, settori dell'architettura, dell'ingegneria, delle costruzioni e delle operazioni (AECO) e della gestione delle strutture (FM) nei settori degli edifici e delle infrastrutture.

«Sin dalla sua istituzione nel 1995, buildingSMART si è concentrato sulla risoluzione di problemi trasversali al settore, sviluppando in modo collaborativo soluzioni e standard aperti, neutrali e internazionali per la condivisione di dati digitali per l'industria delle costruzioni. Gli standard sviluppati fino ad ora da buildingSMART sono:

- IFC (Industry Foundation Classes): uno schema dati specifico del settore AEC;
- MVD (Model View Definition): un sotto insieme dello schema dati che supporta determinati casi d'uso;
- IDM (Information Delivery Manual): una metodologia per la definizione e la documentazione dei processi aziendali e dei requisiti dei dati;
- BCF (BIM Collaboration Format): dei protocolli di comunicazione basati sul modello e indipendenti dal software;

- bSDD (buildingSMART Data Dictionary): una libreria standard di definizioni generali degli oggetti BIM e dei loro attributi.
- IDS (Information Delivery Specifications): la definizione dei requisiti di scambio di un modello»<sup>10</sup>

La standardizzazione è importantissima per la diffusione del BIM. Gli standard internazionali per la condivisione dei dati sono necessari per poter scambiare informazioni elettroniche tra i diversi operatori della filiera e per una completa digitalizzazione del processo edilizio. Soltanto standard aperti, non proprietari e condivisi internazionalmente possono, per definizione, essere ampiamente adottati dai software e abilitare l'integrazione della conoscenza sotto forma di dati.

In Europa vi sono tantissimi gruppi di lavoro incentrati sull'evoluzione del formato IFC e sulla strutturazione dei dati. La Commissione europea collabora con l'EU BIM Task Group dal 2016. Il "Manuale UE per l'introduzione del Building Information Modeling da parte del settore pubblico europeo" è stato pubblicato nel 2017 come un importante risultato di questa collaborazione.

In Europa la norma tecnica di riferimento è la ISO<sup>11</sup> 19650. Poiché la ISO 19650 ricade all'interno del "Vienna Agreement", accordo internazionale in base al quale le norme ISO che in esso ricadono, divengono automaticamente norme europee, la norma diventa in automatico ISO EN. Il gruppo di lavoro CEN<sup>12</sup> non ha la possibilità di apportare ulteriori modifiche; sarà possibile solo aggiungere le appendici nazionali la cui valenza è, naturalmente, limitata agli specifici ambiti geografici. La norma ISO 19650, in linea generale, definisce i concetti e i principi per i processi nel settore dell'ambiente costruito, a sostegno della gestione e produzione di informazioni durante il ciclo di vita dei beni costruiti attraverso l'utilizzo del Building Information Modeling. Questi processi sono in grado di determinare risultati positivi per i proprietari, gli operatori, i clienti, le catene di approvvigionamento e i soggetti coinvolti nelle fonti di finanziamento, attraverso la creazione di *project information models*. La norma è destinata a tutte le figure coinvolte

---

<sup>10</sup> Fonte: buildingSMART Italia (<https://www.buildingsmartitalia.org/standard/> - accesso il 18/09/2023).

<sup>11</sup> ISO (International Organization for Standardization) è la più importante organizzazione mondiale che si occupa di definire le norme tecniche, dette anche norme ISO, oppure Standard ISO.

<sup>12</sup> Comitato europeo di normazione, meglio noto con l'acronimo CEN, è un ente normativo che ha lo scopo di armonizzare e produrre norme tecniche europee (EN, European Norm) in collaborazione con enti normativi nazionali e sovranazionali, tra cui l'ISO.

negli appalti, nella progettazione, costruzione e nella messa in servizio del patrimonio costruito, e coloro che si occupano delle attività di asset management.

Il panorama normativo riguardante BIM è in continua evoluzione. Ad oggi lo standard ISO 19650, pubblicato per la prima volta nel febbraio 2017, relativo a “Organizzazione e digitalizzazione delle informazioni relative all'edilizia e alle opere di ingegneria civile, incluso il Building Information Modeling (BIM) - Gestione informativa mediante il Building Information Modeling”, si compone di 5 parti (Figura 1.22):

- UNI EN ISO 19650-1:2019 – Parte 1: Concetti e principi;
- UNI EN ISO 19650-2:2019 – Parte 2: Fase di consegna dei cespiti immobili;
- UNI EN ISO 19650-3:2021 – Parte 3: Fase gestionale dei cespiti immobili;
- UNI EN ISO 19650-4:2022 – Parte 4: Scambio di informazioni;
- UNI EN ISO 19650-5:2020<sup>13</sup> – Parte 5: Approccio orientato alla sicurezza per la gestione informativa.<sup>14</sup>

«Ulteriori norme ISO legate al BIM sono:

- UNI EN ISO 16757: Strutture dati per i cataloghi elettronici di prodotto per servizi in edilizia - Parte 1: Concetti, architetture e modelli (del 2019) e Parte 2: Geometria (del 2019), che analizzano tutti gli aspetti legati ai prodotti: tipo di proprietà ad essi legati, geometrie, descrizione, ecc.
- UNI EN ISO 12006: Edilizia - Organizzazione dell'informazione delle costruzioni Parte 2: struttura per la classificazione (del 2020) e Parte 3: struttura per informazioni orientate agli oggetti (del 2022); normative orientate a definire le informazioni (classi, sottoclassi, intero, parte, sistemi, sottosistemi, oggetto) e il linguaggio macchina per specificare i dati in forma univoca;
- UNI EN ISO 23386: Metodologia per descrivere, creare e mantenere proprietà nei dizionari di dati interconnessi (del 2020) e la UNI EN ISO 23387 Building Information Modeling (BIM) - Modelli di dati per oggetti da costruzione utilizzati nel ciclo di vita dei beni edilizi - Concetti e principi (del 2020);
- UNI EN ISO 29481: Modelli di informazioni di edifici - Guida per lo scambio di informazioni - Parte 1: Metodologia e formato (del 2017) in cui si parla dei formati di

---

<sup>13</sup> La dicitura UNI EN indica l'adozione della norma ISO sia a livello nazionale (UNI) sia a livello europeo (EN), per cui valida in Italia e in Europa.

<sup>14</sup> Fonte: UNI (<https://www.uni.com/?s=iso+19650> - accesso il 18/09/2021).

scambio delle informazioni e Parte 3: Schema dei dati (del 2022), più specifica sulla definizione di linkset e proprietà degli oggetti.»<sup>15</sup>



**Figura 1.22 – Sequenza temporale norme UNI EN ISO 19650 e delle ulteriori norme ISO, attualmente in vigore (Fonte: D Gregorio M., Romano A., Normativa BIM: da dove partire? Ingegno Rivista tecnica digitale, <https://www.ingegno-web.it/articoli/normativa-bim-da-dove-partire/>)**

All’emanazione della ISO EN 19650, gli stati membri del CEN sono stati chiamati ad intervenire sulle eventuali normative tecniche nazionali pubblicate, il cui contenuto, se non in contrasto con la norma EN, potrà essere aggiunto come allegato nazionale.

In Italia, la norma nazionale sul BIM, sviluppata e costantemente aggiornata dall’UNI<sup>16</sup>, è la UNI 11337, relativa a “Edilizia e opere di ingegneria civile - Gestione digitale dei processi informativi delle costruzioni” e che, ad oggi, si compone di 7 parti (Figura 1.23):

- UNI 11337-1:2017 - Parte 1: Modelli, elaborati e oggetti informativi per prodotti e processi;
- UNI/TR 11337-2:2021 - Parte 2: Flussi informativi e processi decisionali nella gestione delle informazioni da parte della committenza;
- UNI/TS 11337-3:2015 - Parte 3: Modelli di raccolta, organizzazione e archiviazione dell'informazione tecnica per i prodotti da costruzione;

<sup>15</sup> Fonte: D Gregorio M., Romano A., Normativa BIM: da dove partire? Ingegno-web.it, Rivista tecnica digitale. (<https://www.ingegno-web.it/articoli/normativa-bim-da-dove-partire/> - accesso il 18/09/2023).

<sup>16</sup> L’UNI (Ente di Normazione Italiano) è un’associazione privata senza scopo di lucro, che partecipa in rappresentanza dell’Italia all’attività di normazione degli organismi internazionali di normazione ISO e CEN. L’UNI si occupa di elaborare norme sviluppate da organi tecnici, promuovere l’armonizzazione delle norme a livello mondiale ed europeo, pubblicare e diffondere le norme tecniche e i prodotti editoriali a esse correlati.

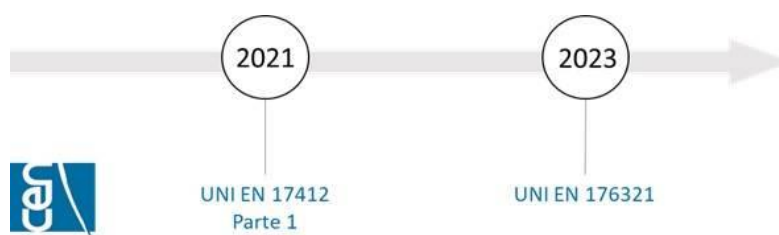
- UNI 11337-4:2017 - Parte 4: Evoluzione e sviluppo informativo di modelli, elaborati e oggetti;
- UNI 11337-5:2017 - Parte 5: Flussi informativi nei processi digitalizzati;
- UNI/TR 11337-6:2017 - Parte 6: Linea guida per la redazione del capitolato informativo;
- UNI 11337-7:2018 - Parte 7: Requisiti di conoscenza, abilità e competenza delle figure coinvolte nella gestione e nella modellazione informativa.<sup>17</sup>



**Figura 1.23 – Sequenza temporale norme UNI 11337, attualmente in vigore (Fonte: D Gregorio M., Romano A., Normativa BIM: da dove partire? Ingenio Rivista tecnica digitale, <https://www.ingenio-web.it/articoli/normativa-bim-da-dove-partire/> - accesso il 24/09/2023)**

«Ulteriori norme CEN legate al BIM, sono:

- UNI EN 17412-1: Building Information Modeling - Livello di fabbisogno informativo - Parte 1: Concetti e principi (del 2021);
- UNI EN 17632-1: Building Information Modeling (BIM) - Modellazione e collegamento semantico (SML) - Parte 1: Schemi di modellazione generica (del 2023). (Figura 1.24)».<sup>15</sup>



**Figura 1.24 - Sequenze temporali delle ulteriori norme CEN riguardanti il BIM, attualmente in vigore (Fonte: D Gregorio M., Romano A., Normativa BIM: da dove partire? Ingenio Rivista tecnica digitale, <https://www.ingenio-web.it/articoli/normativa-bim-da-dove-partire/>)**

<sup>17</sup> Fonte: UNI (<https://www.uni.com/?s=uni+11337> - accesso il 18/09/2023).

## 2. INTEROPERABILITÀ NELLA PROGETTAZIONE BIM

Il progetto e la costruzione di una qualsiasi opera edilizia coinvolgono diverse figure che operano all'interno della propria area di interesse, si avvalgono dei propri strumenti e richiedono una serie di informazioni necessarie per poter operare. L'esigenza dell'interoperabilità nasce al fine di creare una collaborazione efficace per la realizzazione di un progetto condiviso. Uno degli aspetti che sta alla base dell'interoperabilità è quello di eseguire lo scambio di informazioni in modo da poter utilizzare lo stesso modello per le diverse tipologie di analisi, riducendo le possibilità che si verifichino errori e velocizzando enormemente il processo progettuale.

Il modello informativo di un'opera edilizia, realizzata secondo la metodologia BIM, ha la capacità intrinseca di essere processato dalle diverse discipline, per i rispettivi tipi di analisi, in quanto contenitore di una grande varietà di informazioni.

In questo capitolo viene analizzata l'interoperabilità del BIM, facendo riferimento all'attuale stato dell'arte presente in letteratura scientifica. Nello specifico, particolare attenzione viene posta per quanto riguarda lo scambio di dati nel flusso di lavoro architettonico-strutturale (*BIM to FEM*).

Secondo un report del 2014, proposto dalla McGraw Hill Construction<sup>18</sup>, il rapporto valore/difficoltà per analisi ingegneristiche che prevedono l'uso del BIM è molto basso. Per l'analisi strutturale questo rapporto riporta valori negativi, il che significa che un ingegnere strutturale preferisca creare un modello di analisi strutturale ex novo piuttosto che riutilizzare il modello BIM generato dal corrispondente processo di progettazione architettonica<sup>19</sup>.

Tuttavia, già nel **2017**, nel lavoro di ricerca realizzato da **Muller, et al.**, l'uso del BIM viene rilevato come un miglioramento nel workflow di progettazione. Il lavoro proposto dai ricercatori, nello specifico, presenta un confronto tra due possibili workflow per la progettazione strutturale di strutture in calcestruzzo armato: uno che utilizza solo il CAD (Figura 2.1) e uno che introduce il BIM (Figura 2.2).

---

<sup>18</sup> McGraw Hill Construction. (2014). The Business Value of BIM for Construction in Major Global Markets: How Contractors Around the World Are Driving Innovation with Building Information Modeling. McGraw Hill. (Disponibile su: <https://www.construction.com/toolkit/reports/bim-business-value-construction-global-markets>).

<sup>19</sup> Somaini, J. (2021). BIM Interoperability in the Structural Engineer Workflow: State-of-the-art from a Literature Review [MSc thesis]. Politecnico di Milano.

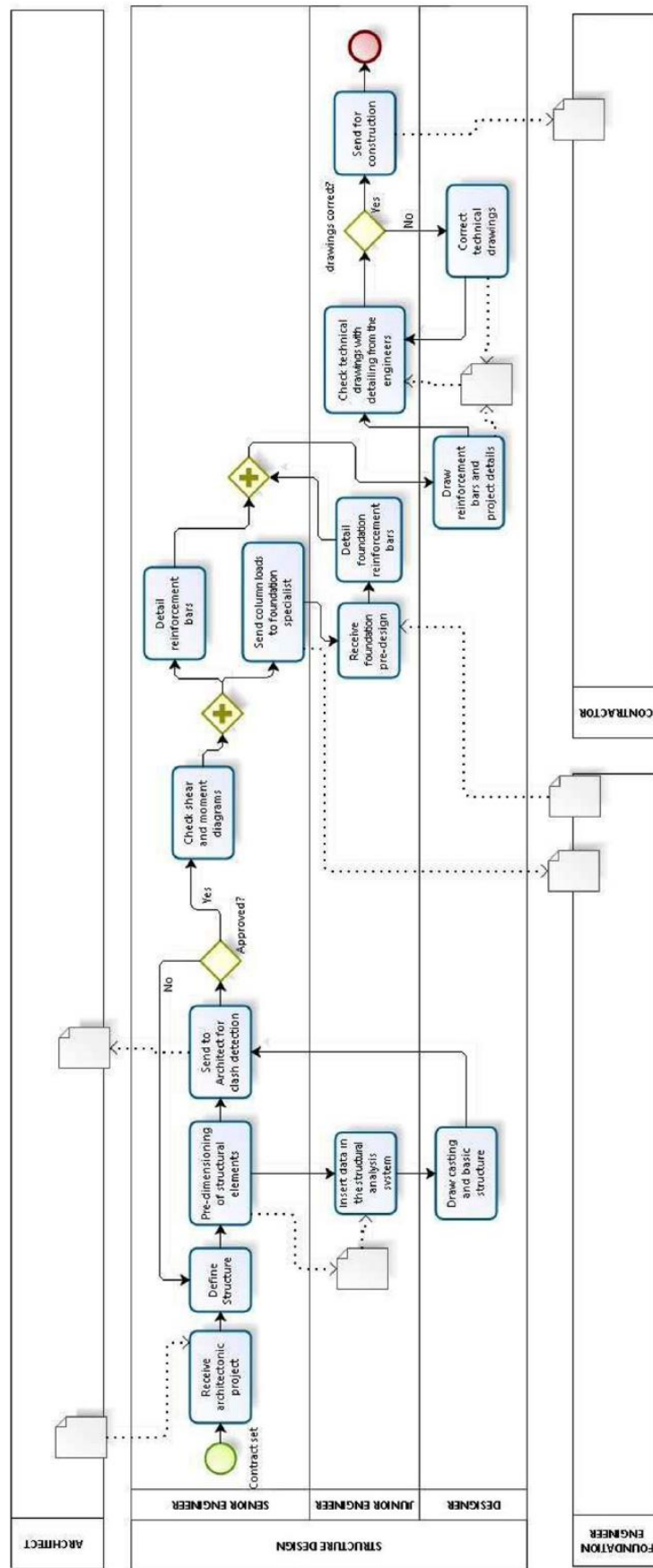


Figura 2.1 – Workflow CAD, proposto da Muller, M.F. et al., 2017.



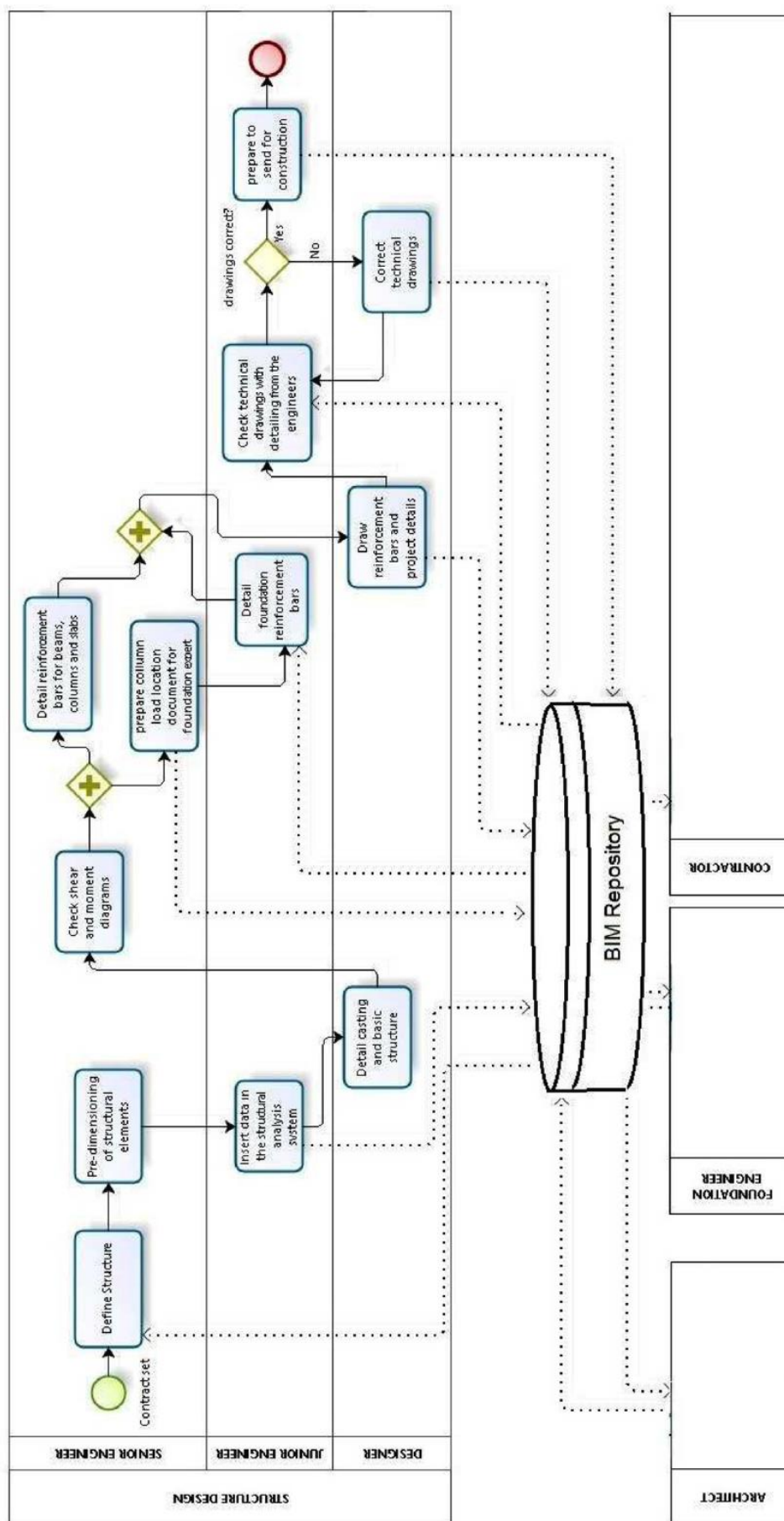


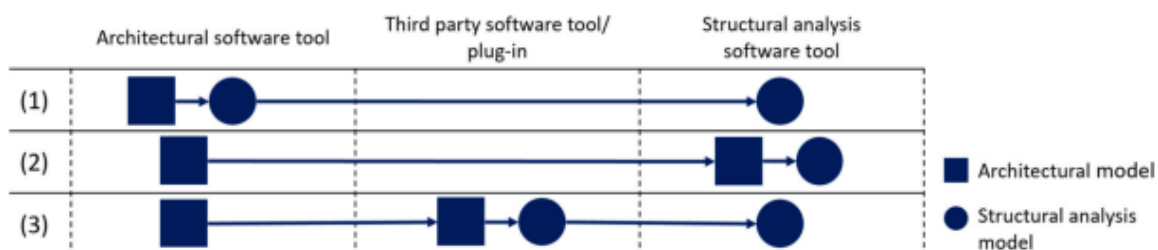
Figura 2.2 - Workflow BIM, proposto da Muller, M.F. et al., 2017.

Secondo gli autori, il workflow CAD richiede molte fasi di controllo delle interferenze, verifica e trasferimento dei file. Tali file spesso non hanno lo stesso formato e talvolta è persino necessario reinserire i dati al passaggio tra i sistemi. Al contrario, utilizzando un workflow che implementa il BIM, si ottiene un miglioramento del processo poiché molte attività e i trasferimenti di file sono semplificati o addirittura esclusi, riducendo al minimo gli errori con conseguente risparmio di tempo. Nel workflow proposto, il modello BIM viene mostrato come un repository per aggregare tutte le informazioni necessarie e fa in modo che i progettisti possano inserire i rispettivi dati direttamente nel repository del modello.

Uno degli aspetti fondamentali che gli autori rilevano da questo studio è la necessità, nel workflow BIM, di utilizzare delle informazioni interoperabili. Ad oggi, gli scambi delle informazioni possono attuarsi grazie ai nuovi supporti tecnologici e agli sviluppi relativi all'interoperabilità dei dati.

**Ramaji et Memari**, nel **2018**, presentano una classificazione completa sui possibili tipi e formati di scambio di dati, tra modelli architettonici e strutturali, affermando che esistono diversi approcci allo scambio dati tra le due discipline. Nello studio da loro proposto vengono identificati tre possibili modi per creare un modello strutturale a partire da un modello architettonico informatizzato (Figura 2.3). Questi possibili modi sono classificati in base al modo in cui vengono trasmesse le informazioni dal software di partenza al software di analisi strutturale:

- 1) modello di analisi strutturale creato in uno strumento software nativo;
- 2) modello di analisi strutturale creato da un modello nativo mediante uno strumento di analisi strutturale;
- 3) modello di analisi strutturale creato utilizzando uno strumento software aggiuntivo (o un plug-in).



**Figura 2.3 – Possibilità per generare un'analisi strutturale, partendo da un modello proveniente da un software di BIM authoring (Sibenik et Kovacic, 2020).**

**Aldegeily et Zhang**, nel **2019**, hanno testato tre modi per scambiare dati, identificandoli in:

- collegamento diretto utilizzando un file nativo;
- collegamento diretto tramite API (Application Programming Interface);
- collegamento indiretto attraverso un canale di terze parti.

Questa seconda classificazione pone attenzione sulle parti che definiscono lo scambio delle informazioni: un unico fornitore di software, due fornitori di software interoperanti o un ulteriore fornitore che non fa parte degli strumenti software interoperanti.

Nello studio di **Borrmann, et al., (2015)**, vengono invece definiti gli approcci comunemente più usati nella pratica di trasferimento delle informazioni:

- aperto: si riferisce ad un workflow in cui viene utilizzato un formato aperto e non proprietario per scopi di scambio di dati;
- chiuso: si riferisce ad un workflow in cui vengono utilizzati strumenti software di un solo produttore di software (o di diversi produttori che cooperano).

L'industria del software fornisce strumenti per il settore AEC in grado di supportare sia lo scambio aperto di dati che lo scambio chiuso da software a software (Sibenik et al., 2020).

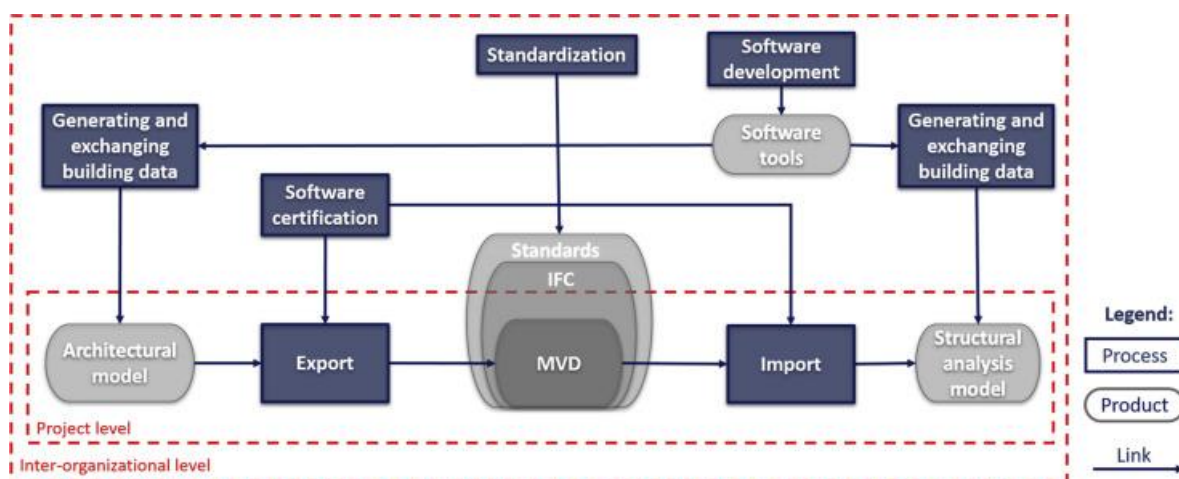
La comunità accademica si concentra sul miglioramento dello scambio aperto, in particolare sullo standard IFC, ampiamente utilizzato nel settore AEC e supportato tra i domini di analisi architettonica e strutturale. Oggi, i principali software commerciali, nei campi della progettazione architettonica e dell'analisi strutturale, supportano l'importazione o l'esportazione o entrambe di modelli contenenti informazioni nel formato IFC. Tuttavia, i workflow per lo scambio delle informazioni, che utilizzano il modello di dati di costruzione IFC, sono ancora di tipo sequenziale e non condivisi in tempo reale.

Parallelamente agli strumenti software che supportano l'esportazione e/o l'importazione di informazioni nel formato IFC esistono anche software con le sole funzionalità di gestione dei modelli IFC. Tra queste funzionalità, le principali sono: la visualizzazione del modello IFC, la mappatura su formati di file aggiuntivi, il controllo della sintassi dei file IFC e la modifica dei file IFC, utile per la preparazione del file per un'ulteriori condivisioni (ad esempio piattaforma *BIMserver* open source, *BIMData* o *xbim*) (Sibenik et al., 2020).

Nel **2020**, **Sibenik et Kovacic**, in un loro lavoro di ricerca fanno un'estensione al workflow architettonico-strutturale, includendo anche fattori esterni al livello progettuale che vanno ad influire nella trasmissione delle informazioni. In questo caso si può parlare di

“*data transmission flow*”, il quale abbraccia anche il livello inter-organizzativo all’interno del flusso di informazioni.

Lo schema proposto mostra i processi che avvengono durante lo scambio di informazioni tra il modello architettonico e il modello di analisi strutturale, utilizzando lo standard IFC. I processi di trasmissione delle informazioni che avvengono a livello di progetto sono mostrati nel rettangolo tratteggiato interno della Figura 2.4. I processi che influenzano il livello inter-organizzativo sono: la certificazione del software, la standardizzazione, lo sviluppo del software e la generazione e lo scambio di informazioni della costruzione, la loro relazione con il livello di progetto. I processi di trasmissione delle informazioni che avvengono a livello inter-organizzativo sono rappresentati all’interno del rettangolo tratteggiato esterno di Figura 2.4.



**Figura 2.4 – Data transmission flow nei processi interni al progetto e a livello inter-organizzativo**  
(Sibenik et Kovacic, 2020).

## 2.1 Standard buildingSMART: IFC e MVD

Nell’ambito del processo di gestione delle informazioni, comprendere il significato degli standard IFC, MVD o IDS è molto importante, specialmente in ambito di scambio strutturato di informazioni nell’industria AEC.

Gli standard internazionali per la condivisione dei dati sono indispensabili per poter consentire l’interoperabilità delle informazioni digitali, tra i diversi operatori dell’industria AEC. Gli standard sviluppati da buildingSMART sono in fase di sviluppo e, ad oggi, i software sviluppati per l’industria AEC, presentano molti limiti nello sfruttare l’interoperabilità delle informazioni che si dovrebbe ottenere con l’applicazione degli stessi standard. I limiti principali che si riscontrano riguardano la possibilità di poter avere un’informazione completa secondo lo standard (alcuni software non consentono di inserire

tutte le informazioni) e la possibilità di potere utilizzare le informazioni tra i software in quanto, spesso, nelle conversioni del formato dei dati, alcune informazioni vengono perse. Tali limiti si riconoscono come delle vere e proprie criticità quando si vogliono trasferire delle informazioni del modello architettonico creato su software di BIM Authoring ad un software per l'analisi strutturale, utilizzando un formato standard aperto come l'IFC (Industry Foundation Classes).

Uno degli scopi del formato IFC è quello includere l'analisi strutturale basandosi interamente sugli elementi preesistenti del modello, perché interdisciplinari, e combinando le ipotesi e i dati della suddetta disciplina. La stessa buildingSMART riconosce alcune lacune per quanto riguarda il dominio dell'analisi strutturale (*IfcStructuralAnalysisDomain*), in quanto non è stata ancora prevista una standardizzazione delle informazioni su tutti i diversi aspetti che fanno parte di questo dominio. Un'ulteriore complicazione è quella connessa ai produttori dei software, i quali a volte tendono ancora a privilegiare l'interoperabilità interna tra i propri applicativi, specifici per le singole discipline.

È, quindi, importante che i produttori di software possano avere delle linee guida complete su ogni dominio e degli strumenti per poter sviluppare i loro prodotti in ottica di interoperabilità condivisa. Allo stesso tempo è importante incentivare i produttori dei diversi software all'applicazione coordinata di tutti gli standard, in modo da garantire l'interoperabilità delle informazioni anche tra i software di diversi produttori.

### **- IFC (Industry Foundation Classes)**

Lo standard IFC (Industry Foundation Classes) definisce la struttura logica dei dati (schema) ed è descritto nello standard ISO 16739. Lo standard IFC definisce le librerie di classi per la programmazione orientata agli oggetti rivolta agli sviluppatori di software/applicazioni. È uno dei sei standard sviluppati da buildingSMART, implementato nell'approccio OpenBIM, approccio che si basa su: interoperabilità, standard aperti e neutrali, scambi di dati affidabili, flussi di lavoro collaborativi, flessibilità di scelta, sostenibilità.

L'IFC può anche essere usato come mezzo per archiviare informazioni sul progetto. I dati condivisi continuano a svilupparsi dopo la fase di progettazione, in modo incrementale, fino alla fase di costruzione "as built". Le informazioni create dal progettista diventano un formato elettronico intelligente e possono essere utilizzate nella gestione e manutenzione

delle costruzioni.<sup>20</sup>

«L'IFC è uno standard internazionale aperto per i dati BIM che vengono scambiati e condivisi tra le applicazioni software utilizzate dai vari operatori del settore dell'industria delle costruzioni o del facility management. Lo standard include definizioni dei dati richiesti per tutto il ciclo di vita di un'opera edilizia. L'attuale versione dello standard, e le prossime versioni, sono state estese al fine di includere anche le definizioni dei dati necessari alle opere infrastrutturali, durante il loro ciclo di vita.

Le Industry Foundation Classes specificano uno schema di dati e una struttura del formato di file di scambio. Lo schema dei dati è definito in:

- Linguaggio di specifica dei dati EXPRESS, definito nella norma ISO 10303-11;
- XML Schema Definition Language (XSD), definito nella raccomandazione XML Schema W3C. La definizione dello schema XML è generata dallo schema EXPRESS secondo le regole di mappatura definite nella norma ISO 10303-28.

I formati di file di scambio per lo scambio e la condivisione dei dati secondo lo schema concettuale sono:

- codifica testuale aperta della struttura dello scambio, definita nella norma ISO 10303-21;
- extensible Markup Language (XML), definito nella raccomandazione XML W3C.

[...] Le norme di riferimento dello standard IFC sono:

- ISO 10303-11: Sistemi di automazione industriale e integrazione - Rappresentazione e scambio di dati di prodotto - Parte 11: metodi di descrizione: Manuale di riferimento del linguaggio EXPRESS;
- ISO 10303-21: Sistemi di automazione industriale e integrazione - Rappresentazione e scambio di dati di prodotto - Parte 21: Metodi di implementazione: codifica del testo in chiaro della struttura di scambio;
- ISO 10303-28: Sistemi di automazione industriale e integrazione - Rappresentazione e scambio di dati di prodotto - Parte 28: Metodi di implementazione: rappresentazioni XML di schemi e dati EXPRESS, utilizzando schemi XML.

---

<sup>20</sup> (Fonte: <https://www.buildingsmartitalia.org/standard/standard-bs/industry-foundation-classes-ifc/> - accesso il 22/09/2023).

[...] Lo standard IFC include termini, concetti ed elementi di specifica dei dati che provengono direttamente dal campo di applicazione delle discipline, mestieri e professioni del settore industriale dell'edilizia e della gestione delle strutture. Termini (*terms*) e concetti (*concepts*) utilizzano parole inglesi semplici, i dati elementari (*data items*) all'interno della specifica dati seguono una convenzione di notazione:

- i nomi dei dati elementari (*data items*) di: tipi (*types*), entità (*entities*), regole (*rules*) e funzioni (*functions*), iniziano con il prefisso "*Ifc*" e continuano con i rispettivi termini in inglesi nella notazione CamelCase<sup>21</sup>;
- i nomi degli attributi (*attribute names*) all'interno di un'entità seguono la notazione CamelCase senza prefisso;
- le definizioni degli insiemi di proprietà (*property set*) che fanno parte di questo standard iniziano con il prefisso "*Pset\_*" e continuano con i termini inglesi nella notazione CamelCase;
- le definizioni dei set di quantità (*quantity set*) che fanno parte di questo standard iniziano con il prefisso "*Qto\_*" e continuano con i termini inglesi nella notazione CamelCase.

L'architettura dello schema dei dati di IFC (Figura 2.5) è organizzata su quattro livelli concettuali, ogni singolo schema è assegnato esattamente ad un livello concettuale:

- livello delle risorse (*Resource layer*): è il livello più basso che comprende tutti gli schemi individuali contenenti le definizioni delle risorse, tali definizioni non includono un identificatore univoco globale e non devono essere utilizzate indipendentemente da una definizione dichiarata a un livello superiore;
- livello centrale (*Core layer*): è il livello successivo al livello delle risorse che include lo schema del nucleo (*kernel*<sup>22</sup>) e gli schemi di estensione principale (*Core Extension*), contenenti le definizioni generali delle entità. Tutte le entità definite nel livello principale o superiore portano un ID univoco globale e facoltativamente

---

<sup>21</sup> CamelCase (carattere a cammello) è una tipologia di notazione che prevede di scrivere parole composte o frasi unendo tutte le parole tra loro, ma lasciando le loro iniziali maiuscole.

<sup>22</sup> Il kernel (nucleo) è la parte più astratta o centrale dello standard. Cattura i costrutti generali degli oggetti (oggetto, proprietà e relazione) che vengono poi specializzati in costrutti specifici non AEC/FM, come prodotto, processo, controllo e risorsa, che costituiscono i principali punti di ingresso per il livello successivo all'interno dell'architettura dello schema, il livello Core Extension (Fonte buildingSMART <https://standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC2x3/TC1/HTML/ifckernel/ifckernel.htm> - accesso il 22/09/2023).

informazioni sul proprietario e sulla cronologia;

- livello di interoperabilità (*Interoperability layer*): è il livello successivo al livello centrale che include gli schemi contenenti le definizioni di entità specifiche per un prodotto, un processo o una tipologia di risorse utilizzata in diverse discipline, tali definizioni sono tipicamente utilizzate per lo scambio tra i diversi domini e la condivisione di informazioni dell'opera edilizia;
- livello del dominio (*Domain layer*): è il livello più alto che include gli schemi contenenti le definizioni di entità che sono le specifiche di prodotti, processi o risorse per una determinata disciplina; tali definizioni sono generalmente utilizzate per lo scambio intra-dominio e la condivisione di informazioni.»<sup>23</sup>

Gli schemi di dati specifici del dominio contengono le specializzazioni finali delle entità. Le entità definite in questo livello sono autonome e non possono fare riferimento a nessun altro livello. Il livello specifico del dominio organizza le definizioni in base alla disciplina del settore. Tra i domini presenti nello schema IFC (Figura 2.5), si riporta a seguire solamente un approfondimento sui domini architettonico, elementi strutturali e analisi strutturale:

- «Lo schema *IfcArchitectureDomain* definisce i concetti di base degli oggetti utilizzati nel dominio architettonico che non sono stati generalizzati e più approfonditi nel modello architettonico (condivisi con altri domini o tipi di applicazioni). La maggior parte degli elementi utilizzati nel dominio architettonico sono condivisi con altri domini e sono di conseguenza dichiarati in schemi di livello inferiore, come *IfcProductExtension* o *IfcSharedBldgElements*.
- Lo schema *IfcStructuralElementsDomain* offre la possibilità di rappresentare diversi tipi di elementi costruttivi e parti di elementi costruttivi che in generale sono di natura strutturale. Oltre agli elementi edilizi di uso generale già definiti nello schema *IfcSharedBuildingElements*, lo schema contiene entità per rappresentare parti di fondazione, come fondazioni e pali, nonché alcuni importanti elementi strutturali inclusi in altri componenti edilizie, come diversi tipi di rinforzo, caratteristiche costruttive e trattamenti.

---

<sup>23</sup> (Fonte: [https://standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4\\_1/FINAL/HTML/link/annex-e.htm](https://standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4_1/FINAL/HTML/link/annex-e.htm) - accesso il 22/09/2023).



- Lo schema *IfcStructuralAnalysisDomain* definisce il modello di analisi strutturale al fine di integrare strettamente il dominio dell'ingegneria strutturale. Tale schema riutilizza la definizione esistente dell'elemento edilizio e dell'elemento della struttura spaziale associandone le ipotesi strutturali. L'obiettivo è garantire che le informazioni sull'ingegneria strutturale vengano acquisite e rese visibili ad altri domini correlati.

In questo dominio sono comprese le seguenti funzionalità di:

- definizione dei modelli di analisi strutturale planari e/o spaziali che possono essere utilizzati dalle applicazioni di analisi strutturale. Sono inclusi, sostanzialmente: elementi strutturali curvi diritti o curvi, elementi strutturali superficiali piani o curvi; collegamenti e supporti puntuali, curvi e superficiali;
- definizione dei carichi, compresi i carichi puntuali, curvilinei, superficiali, termici, la loro assegnazione a gruppi di carico, casi di carico e combinazioni di carico;
- definizione di diversi modelli di analisi strutturale per descrivere diversi aspetti o parti dell'edificio. Inoltre, le dipendenze tra questi modelli possono essere archiviate nel modello per un ulteriore utilizzo.
- risultati dell'analisi definiti da forze e spostamenti.

Attualmente non rientrano in questo dominio:

- l'analisi dinamica;
- la descrizione dei carichi precompressi;
- la metodologia degli elementi finiti;
- risultati dettagliati di mesh agli elementi finiti, nonché delle sollecitazioni e delle deformazioni degli elementi strutturali.»<sup>24</sup>

---

<sup>24</sup> (Fonte: [https://standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4\\_1/FINAL/HTML/link/annex-d.htm](https://standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4_1/FINAL/HTML/link/annex-d.htm) - accesso il 22/09/2023).

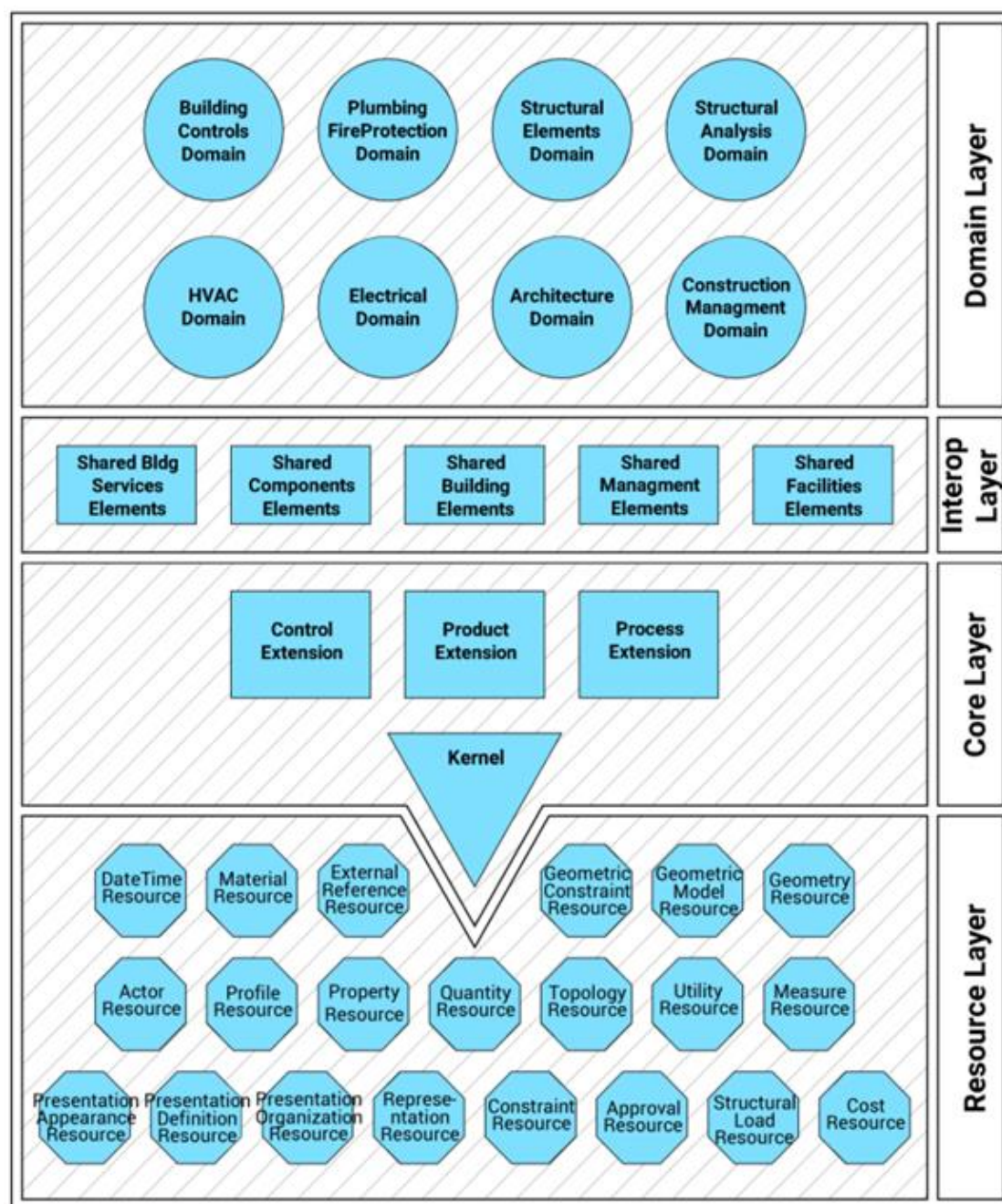


Figura 2.5 - Architettura dello schema dati di IFC e layer concettuali (Fonte:

[https://standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4\\_1/FINAL/HTML/introduction.htm](https://standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4_1/FINAL/HTML/introduction.htm) - accessi il 27/09/2023).

Lo standard IFC è quello più maturo sviluppato da buildingSMART, ha una lunga storia e molteplici implementazioni nei software (Tabella 2). La prima generazione è la IFC 1.0, del 1997, seguita dalla versione IFC2x pubblicata nel novembre 2000. Introduce il concetto di modello principale ed estensioni di dominio. Nel 2001 i problemi con la versione iniziale di IFC2x sono stati risolti all'interno della versione IFC2x Addendum 1.

La versione iniziale di IFC2x2 viene pubblicata nel 2003 come primo successore della

nuova piattaforma IFC IFC2x. Introduce molte estensioni per supportare meglio il servizio di costruzione e il dominio strutturale, ad esempio contiene il primo sotto modello IFC per l'analisi strutturale e molte altre estensioni. Anche l'inclusione di contenuti 2D all'interno dello spazio modello di un modello BIM (linea, testo, simboli) e le informazioni di presentazione (colore, tratteggio, proprietà della superficie, come ombreggiatura e rendering) sono nuove in IFC2x2. I problemi con la versione iniziale di IFC2x2 sono stati risolti nella versione IFC2x2 Addendum 1, pubblicata nel 2004. La versione IFC2x3 è stata pubblicata nel 2006 come successore di IFC2x2. IFC2x3 è principalmente una versione di miglioramento della qualità, è un perfezionamento su IFC2x2. Nel 2007 la versione IFC2x (come tutte le versioni precedenti di IFC) è stata sostituita dalla versione IFC2x3 RT1.

Nel 2013 viene pubblicato l'IFC4 che apporta alcune migliorie. Nello specifico:

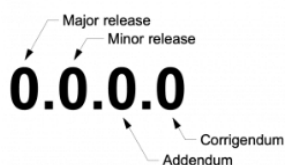
- è uno standard ISO completo e non solo PAS;
- migliora la capacità delle specifiche IFC nei suoi principali elementi architettonici, di servizio dell'edificio e strutturali con nuove caratteristiche geometriche, parametriche e di altro tipo;
- abilita numerosi nuovi flussi di lavoro BIM, tra cui gli scambi di modelli 4D e 5D, produttore, le librerie di prodotti, l'interoperabilità da BIM a GIS, le simulazioni termiche migliorate e valutazioni di sostenibilità;
- collega tutte le definizioni delle proprietà IFC al dizionario dati buildingSMART;
- migliora la leggibilità e la facilità di accesso alla documentazione con numerosi concetti di implementazione ed esempi completamente collegati;
- consente il contenimento dello schema ifcXML4, completamente integrato nelle specifiche IFC oltre allo schema EXPRESS;
- consente la piena integrazione con la nuova tecnologia mvdXML e consente una facile definizione dei servizi di convalida dei dati per l'invio di dati IFC4;
- corregge i problemi tecnici riscontrati dal rilascio di IFC2x3;
- estende l'IFC alle infrastrutture e ad altre parti dell'ambiente costruito;
- implementa traduzioni multilingue dello schema IFC.

Nello stesso anno, viene pubblicato un aggiornamento minore per IFC4 che tiene conto delle esperienze e dei feedback derivanti dalle implementazioni pilota. Nei successivi due anni (2014 e 2015) sono stati sviluppati due aggiornamenti: l'IFC4 Addendum 2 e l'IFC4 Addendum 2 RT1.

Version	Name (HTML Documentation)	ISO publication	Published (yyyy-mm)	Current Status	HTML	EXPRESS	XSD	pSet XSD	OWL HTML	RDF	TTL
4.4-dev	IFC 4.4.x development	not started		Extension of 4.3. Adding additional functionality (mainly for Tunnels).  Currently under development in the Standards & Solutions program							
4.3.2.0	IFC 4.3 ADD2	Currently under ISO FDIS Voting	2023-09	Under FDIS Voting. Basis for IFC Software Certification.	HTML	GitHub output		PSD output			
4.2.0.0	IFC4.2	-	2019-04	Withdrawn	ZIP	EXP	IFC4x2.xsd	-			
4.1.0.0	IFC4.1	-	2018-06	Withdrawn	ZIP	EXP	IFC4x1.xsd	-	ifcOWL IFC4.1	RDF	TTL
4.0.2.1	IFC4 ADD2 TC1	ISO 16739-1:2018	2017-10	Official	ZIP	EXP	IFC4.xsd	-	ifcOWL IFC4 ADD2 TC1	RDF	TTL
4.0.2.0	IFC4 ADD2	-	2016-07	Retired	ZIP	EXP	IFC4_ADD2.xsd	-	ifcOWL IFC4 ADD2	RDF	TTL
4.0.1.0	IFC4 ADD1	-	2015-06	Retired	ZIP	EXP	IFC4_ADD1.xsd	-	ifcOWL IFC4 ADD1	RDF	TTL
4.0.0.0	IFC4	ISO 16739:2013	2013-02	Retired	ZIP	EXP	ifcXML4.xsd	PSD_IFC4.xsd	ifcOWL IFC4	RDF	TTL
2.3.0.1	IFC2x3 TC1	ISO/PAS 16739:2005	2007-07	Official	ZIP	EXP	IFC2X3.xsd	PSD_R2x3.xsl	ifcOWL IFC2x3 TC1	RDF	TTL
2.3.0.0	IFC2x3	-	2005-12	Retired	ZIP	EXP	-	-	ifcOWL IFC2x3	RDF	TTL
2.2.1.0	IFC2x2 ADD1	-	2004-07	Retired	ZIP	EXP	-	-	-	-	-
2.2.0.0	IFC2x2	-	2003-05	Retired	ZIP	EXP	-	-	-	-	-
2.1.1.0	IFC2x ADD1	-	2001-10	Retired	ZIP	EXP	-	-	-	-	-
2.1.0.0	IFC2x	-	2000-10	Retired	ZIP	EXP	-	-	-	-	-
2.0.0.0	IFC2.0	-	1999-10	Retired	-	-	-	-	-	-	-

## Version Notation

IFC versions are identified using the notation "**Major.Minor.Addendum.Corrigendum**".



**Major versions** consist of scope expansions or deletions and may have changes that break compatibility.

**Minor versions** consist of feature extensions, where compatibility is guaranteed for the "core" schema, but not for other definitions.

**Addendums** consist of improvements to existing features, where the schema may change but upward compatibility is guaranteed.

**Corrigendums** consist of improvements to documentation, where the schema does not change though deprecation is possible.

**Tabella 2 – Database delle specifiche IFC (<https://technical.buildingsmart.org/standards/ifc/ifc-schema-specifications/?sfw=pass1668197042> – accesso il 23/09/2023)**

Nel 2018 nasce IFC4.1, con lo scopo principale di fornire una base per le varie estensioni di domini infrastrutturali attualmente in fase di sviluppo. IFC 4.1 viene sostituito nel 2019 da IFC4.2 che estende lo schema IFC per includere la descrizione delle costruzioni di ponti.<sup>25</sup> Nel 2021 è stata pubblicata lo IFC4.3, con lo scopo di estendere lo schema IFC per coprire la descrizione delle costruzioni infrastrutturali all'interno dei domini Ferrovie,

<sup>25</sup> Somaini J., (2021). BIM Interoperability in the Structural Engineer Workflow: State-of-the-art from a Literature Review [MSc thesis]. Politecnico di Milano.



convalida automatizzata.

Gli MVD possono essere ampi quanto quasi l'intero schema (ad esempio per l'archiviazione di un progetto) o specifici come una coppia di tipi di oggetto e dati associati (ad esempio per il prezzo di un sistema di facciata continua).

L'MVD è nato per supportare l'interoperabilità BIM, infatti tra centinaia di applicazioni software, settori industriali e regioni in tutto il mondo, non tutti gli utenti di un dominio progettuale hanno la necessità che tutte le stesse informazioni vengano consegnate o ricevute. Potrebbe quindi essere possibile sviluppare tante MVD quante sono le discipline, consentendo di esportare file più leggeri e coerenti con le reali necessità dello specialista.

Le società software sviluppano programmi che supportano l'esportazione di dati BIM tramite IFC e devono scegliere quali MVD potrebbero supportare i loro prodotti.

In generale, uno strumento di BIM Authoring ha un elenco di opzioni MVD nelle proprie interfacce utente di esportazione IFC, dando all'utilizzatore la possibilità di scegliere l'MVD appropriato in base alle esigenze del destinatario IFC finale.

buildingSMART International pubblica sul sito web le <http://www.buildingSMART-tech.org> le definizioni ufficiali degli standard MVD, oltre ai requisiti di scambio, le specifiche correlate, le definizioni delle viste del modello, gli accordi con gli sviluppatori, i set di dati di esempio, i riferimenti agli strumenti di sviluppo, il forum di discussione e il database dei problemi e i programmi di certificazione.

Tutti gli MVD conosciuti possono essere trovati nel database consultabile di buildingSMART (Tabella 3). Fino ad oggi, la maggior parte delle MVD, implementate negli strumenti di creazione BIM, sono quelle legate alla versione IFC2x3, ma stanno iniziando anche a svilupparsi quelle legate alla versione IFC4.

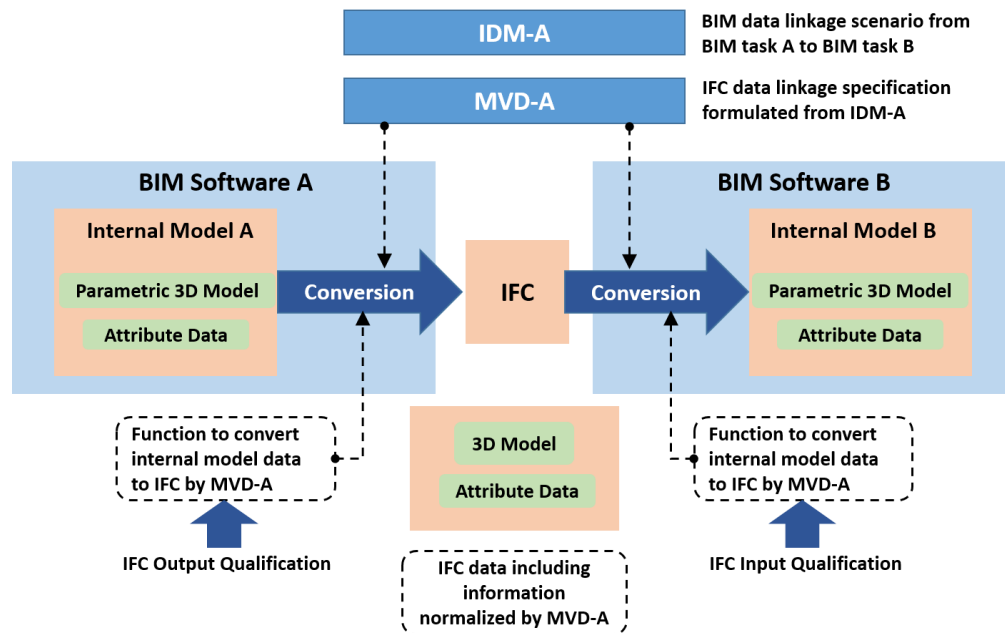
Uno dei problemi principali di questo approccio di trasferimento dati è stato anche riconosciuto da buildingSMART. Nella fase di implementazione di un software, in teoria ogni MVD dovrebbe essere certificato sia per l'importazione che per l'esportazione dei file IFC.

Tuttavia, questo non è possibile in quanto si hanno molti MVD e i fornitori di software, per ottenere tutte le certificazioni, dovrebbero affrontare dei costi che supererebbero i benefici, impedendo alle software house più piccole di far parte di questo sistema<sup>27</sup>. Inoltre, per poter scambiare informazioni, si ha la necessità che tutti i software utilizzati, in un processo BIM, siano in grado di importare ed esportare gli stessi specifici MVD (Figura

---

<sup>27</sup> Fonte: Tetervov V., IFC, MVD, IDS - What's it all about? (<https://www.linkedin.com/pulse/ifc-mvd-ids-whats-all-vitalij-tetervov/> - accesso il 26/09/2023).

2.7), questo aspetto si considera un'ulteriore problematica in quanto si riscontra un grande numero di software che vengono utilizzati nell'industria AEC, che presentano anche funzionalità molto diverse.



**Figura 2.7 - Processo di trasferimento IFC con MVD (Fonte: <https://en.building-smart.or.jp/ifc/mvd/> - accesso il 27/09/2023).**

IFC Schema	MVD Name	Status	Documentation	Summary
IFC4 ADD2 TC1	IFC4Precast	Final	<a href="#">Full documentation (zip)</a>	Exchange of geometric information between CAD and MES systems for automated production of precast building components.
IFC4.2	Bridge Construction View	Draft	<a href="#">BRie 2017.10.24</a>	Build and maintain bridges.
IFC4 ADD2 TC1	Reference View	Final	<a href="#">RV 1.2 HTML RV_1-2.mvdxml</a>	Simplified geometric and relational representation of spatial and physical components to reference model information for design coordination between architectural, structural, and building services (MEP) domains
IFC4 ADD2 TC1	Design Transfer View	Draft	<a href="#">DTV 1.1</a>	Advanced geometric and relational representation of spatial and physical components to enable the transfer of model information from one tool to another. Not a "round-trip" transfer, but a higher fidelity one-way transfer of data and responsibility.
IFC4 ADD2 TC1	Quantity Takeoff View	Draft	<a href="#">mvdXML</a>	Estimate and track construction materials and costs.
IFC4 ADD2 TC1	Energy Analysis View	Draft	<a href="#">EV</a>	Estimate and track energy usage and costs.
IFC4 ADD2 TC1	Product Library View	Draft	<a href="#">LV 0.1</a>	Manufacturer product information and configurations.
IFC4	LandXML view		<a href="#">LandXML MVD 1.2</a>	Basic buildingSMART MVD for LandXML v1.2.
IFC2x3 TC1	Coordination View	Final	<a href="#">CV 2.0</a>	Spatial and physical components for design coordination between architectural, structural, and building services (MEP) domains
IFC2x3 TC1	Space Boundary Addon View	Final	<a href="#">SB 1.1</a>	Identification and export of additional Space Boundaries (polygons which define the extents of a space's contact with directly adjacent surfaces [e.g. walls, floors, ceilings] and openings). Can be used for building energy analysis and quantity take-off.
IFC2x3 TC1	Basic FM Handover View	Final	<a href="#">Diagrams - Documentation</a>	Handover of model information from planning and design applications to CAFM and CMMS applications, as well as the handover of model information from construction and commissioning software to CAFM and CMMS applications

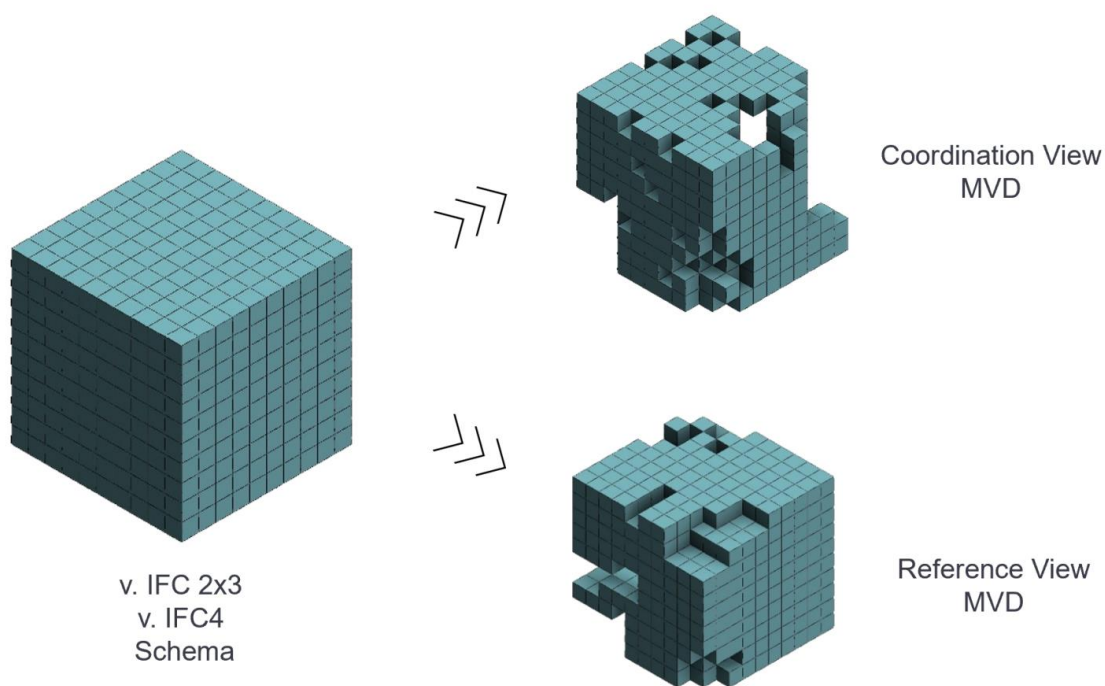


IFC2x3 TC1	Structural Analysis View	Final	<a href="#">SA</a>	The structural analysis model, created in a structural design application by a structural engineer to one or many structural analysis applications.
IFC 2x3	Architectural Design to Building Energy Analysis	Candidate	<a href="#">link</a>	This is not a formal bSI MVD
IFC 2x3	Architectural Design to Circulation/Security Analysis	Proposal	<a href="#">link</a>	This is not a formal bSI MVD
IFC 2x3	Architectural Design to Quantity Takeoff for Cost Estimating	Candidate	<a href="#">link</a>	This is not a formal bSI MVD
IFC 2x3	Architectural Design to Spatial Program Validation	Candidate	<a href="#">link</a>	This is not a formal bSI MVD
IFC 2x3	Concept Design BIM 2010	Official	<a href="#">link</a>	This is not a formal bSI MVD
IFC 2x3	Design to Code Compliance Checking (ICC 2006)	Proposal	<a href="#">link</a>	This is not a formal bSI MVD
IFC 2x3	Nordic Energy Analysis (subset of CDB-2010)	Candidate	<a href="#">link</a>	This is not a formal bSI MVD
IFC 2x3	Architectural design to structural design	Draft	<a href="#">link</a>	This is not a formal bSI MVD
IFC 2x3	Architectural design to thermal simulation	Proposal	<a href="#">link</a>	This is not a formal bSI MVD
IFC 2x3	Architectural Programming to Architectural Design	Draft	<a href="#">link</a>	This is not a formal bSI MVD
IFC 2x3	Curtain Wall Design to Energy Analysis	Draft	<a href="#">link</a>	This is not a formal bSI MVD
IFC 2x3	Extended coordination view	Idea	<a href="#">link</a>	This is not a formal bSI MVD
IFC 2x3	Extensibility	Idea	<a href="#">link</a>	This is not a formal bSI MVD
IFC 2x3	Indoor climate simulation to HVAC design	Proposal	<a href="#">link</a>	This is not a formal bSI MVD
IFC 2x3	Landscape design to road design	Idea	<a href="#">link</a>	This is not a formal bSI MVD
IFC 2x3	Masonry Structural Design to Structural Analysis	Draft	<a href="#">link</a>	This is not a formal bSI MVD
IFC 2x3	Modular Bldgs-Arch.Design to Struc.Design	Draft	<a href="#">link</a>	This is not a formal bSI MVD
IFC 2x3	Precast Concrete Exchanges	Candidate	<a href="#">link</a>	This is not a formal bSI MVD
IFC 2x3	Road design to landscape design	Idea	<a href="#">link</a>	This is not a formal bSI MVD
IFC 2x3	Space Requirements and Targets to Thermal Simulation	Draft	<a href="#">link</a>	This is not a formal bSI MVD
IFC 2x3	Structural design to structural analysis	Proposal	<a href="#">link</a>	This is not a formal bSI MVD
IFC 2x3	Structural Design to Structural Detailing (ATC-75)	Draft	<a href="#">link</a>	This is not a formal bSI MVD
IFC 2x3	Wood Structural Design to Structural Analysis	Draft	<a href="#">link</a>	This is not a formal bSI MVD
IFC 2x3	Architectural design to quantity take-off – level 1	Idea	<a href="#">link</a>	This is not a formal bSI MVD
IFC 2x3	Architectural design to quantity take-off – level 2	Draft	<a href="#">link</a>	This is not a formal bSI MVD
IFC 2x3	Architectural design to quantity take-off – level 3	Idea	<a href="#">link</a>	This is not a formal bSI MVD

**Tabella 3 - MVD Database table (<https://technical.buildingsmart.org/standards/ifc/mvd/mvd-database/> - accesso il 23/09/2023).**



Lo scambio interdisciplinare di dati deve comprendere e unificare i diversi insiemi di informazioni e i modelli richiesti per ciascun dominio; dunque, risultano necessari ben definiti standard che specifichino gli ambiti dei dati per ogni dominio, compresi gli elenchi dei requisiti di scambio dei dati. Attualmente esistono due standard MVD di trasferimento validi per lo schema dati IFC4, che sono: *Project transfer view* e *Reference view*. L'MVD *Reference view* è adatta per flussi di lavoro in cui un modello viene utilizzato solo come riferimento, mentre la *Project transfer view* è progettata per flussi di lavoro in cui l'attività successiva viene eseguita con il modello esportato ed è prevista la modifica del contenuto. Tuttavia, tra le MVD più ampiamente implementate nei software vi è la *Coordination View 2.0*, creato per IFC 2x3, la quale è principalmente destinata alla descrizione di componenti spaziali e fisiche, finalizzata al coordinamento della progettazione tra i domini architettonico, strutturale e impiantistico (MEP) (Figura 2.8).



**Figura 2.8 – Schematizzazione delle MVD (Fonte: Tetervov V., <https://www.linkedin.com/pulse/ifc-mvd-ids-whats-all-vitalij-tetervov/> - accesso il 26/09/2023).**

«Ulteriori MVD diffusi per IFC 2x3 TC1, sono:

- *Space Boundary Addon View*: che consente l'identificazione ed esportazione di ulteriori delimitazioni spaziali, utilizzato principalmente per analisi energetiche degli edifici e quantity take-off;
- *Basic FM Handover View*: consente la consegna di informazioni del modello dalle applicazioni di pianificazione e progettazione alle applicazioni CAFM (Computer

Aided Facility Management) e CMMS (Computerized Maintenance Management System), nonché per il passaggio di informazioni del modello dai software di costruzione e messa in servizio alle applicazioni CAFM e CMMS;

- *Structural Analysis View*: utile al trasferimento del modello di analisi strutturale, creato in un software di progettazione strutturale, verso una o più applicazioni di analisi strutturale.»<sup>28</sup>

L'attuale MVD per l'esportazione del modello di analisi strutturale, per una o più applicazioni di analisi strutturale, è legata alla versione IFC 2x3 RT1. I software per analisi strutturali utilizzano una MVD diversa da quella a loro necessaria, la maggior parte di questi fa riferimento alla *Coordination View 2.0* invece che alla più corretta *Structural Analysis View*.

Nei programmi che fanno uso della *Coordination View 2.0* spesso è l'utente che deve specificare il set di proprietà di esportazione, che dia indicazioni specifiche a riguardo, per poter mantenere informazioni già assegnate all'interno del modello.

In pratica dell'enorme database costituito dal file IFC i software strutturali ottengono e gestiscono informazioni in una parte del file che non è a loro dedicata né specifica, con tutte le conseguenze negative che a ciò possono essere connesse.

Informazioni come: le schematizzazioni degli elementi strutturali, i vincoli esterni e interni, i carichi e le combinazioni di carichi, i materiali, le sezioni e i risultati di analisi non risultano recepibili dalla gran parte dei software, anche nel caso in cui queste informazioni siano presenti nel file. Tale aspetto comporta che a ogni avanzamento di progetto risulti necessario, di volta in volta, reinserirli senza possibilità di mantenimento, né di confronto, con le precedenti versioni.

Sicuramente la creazione di così tante MVD ha portato le diverse software house a selezionarne solo alcune, e in aggiunta a scegliere se implementarle per l'importazione o l'esportazione dei file. Quest'ultimo aspetto ha spinto anche le maggiori software house ad investire nello sviluppo di trasferimenti diretti con file nativo.

Questi presupposti sono stati quelli che hanno sicuramente contribuito alla creazione dello scenario attuale, in cui si ha una moltitudine di software che implementano diverse MVD e che quindi non risultano totalmente interoperabili l'uno con l'altro.

---

<sup>28</sup> (Fonte: <https://www.ingenio-web.it/articoli/le-specifiche-di-scambio-per-modelli-di-dati-model-view-definitions-mvd/> - accesso il 26/09/2023)

## 2.2 Stato dell'arte sull'interoperabilità architettonico-strutturale nel BIM

Nel 2021, **Somaini J.** sviluppa un approfondimento sulla metodologia BIM, con il focus specifico dell'interoperabilità architettonico-strutturale, effettuando un'analisi delle informazioni che erano state proposte in letteratura. In questa ricerca, vengono analizzati ventuno lavori, tra articoli scientifici e tesi di laurea (Tabella 4), nell'intervallo temporale 2008-2021. I testi presi in considerazione presentano prove sperimentali di interoperabilità tra diversi software di BIM Authoring e software di analisi strutturale, evidenziando quali sono state le problematiche derivate dell'interscambio delle informazioni nel workflow architettonico-strutturale.

Infatti, un ruolo molto importante nel workflow applicabile dall'ingegnere strutturista, che intende avvalersi dell'approccio BIM, è giocato sia dal software di BIM Authoring sia dal software di analisi strutturale utilizzati, in quanto i diversi software possono presentare differenti formati e modalità per lo scambio delle informazioni.

Dall'analisi condotta è emerso che vengono seguiti i seguenti approcci:

- *one-to-one*, in cui l'informazione passa da un software all'altro;
- *one-to-many*: in cui l'informazione viene trasferita da un programma a molti altri;
- *many-to-one*: in cui l'informazione viene convogliata da molti software a uno solo;
- *many-to-many*: in cui i dati vengono condivisi da alcuni programmi ad altri software.

L'autore rileva, inoltre, che il software di BIM Authoring più utilizzato è Revit<sup>29</sup>, il quale risulta presente nell'86% dei casi analizzati, seguito da Tekla Structure presente nel 45%, mentre gli altri software, come: Archicad, AECOSim Building Designer, Digital Project, StructureWorks Precast, ProSteel e Vectorworks sono compresi in meno del 25% degli studi analizzati. Questi risultati rappresentano bene la reale distribuzione del mercato, evidenziando quanto Revit sia lo strumento di BIM Authoring più utilizzato al mondo. Per quanto riguarda i software per l'analisi strutturale i più utilizzati negli articoli presi in considerazione da Somaini J., 2021, sono Sap2000 e Robot Structural Analysis Pro.

---

<sup>29</sup> Revit è un software BIM Authoring sviluppato da Autodesk. È un software di modellazione BIM multidisciplinare: che consente la progettazione parametrica architettonica, strutturale e impiantistica. (<https://www.autodesk.it/products/revit/>).

Tra le metodologie di scambio delle informazioni, tra i software BIM Authoring e tra quelli per l'analisi strutturale, si riporta una classificazione proposta da **Aldegeily et Zhang, (2019)**:

- collegamento diretto tramite file nativi: approccio possibile quando una software house fornisce sia applicazioni BIM che di analisi strutturale e consente di scambiare dati utilizzando un formato di file nativo. I dati vengono trasferiti automaticamente e si prevede che nessuno di essi vada perduto durante questo processo;
- collegamento diretto tramite API<sup>30</sup>: approccio possibile quando una software house sviluppa un'API o offre la possibilità ad altre software house di sviluppare interfacce in grado di far comunicare i programmi delle due parti. In questo caso gli sviluppatori del software BIM forniscono agli sviluppatori dell'analisi strutturale un'API per progettare un collegamento diretto tra le due applicazioni;
- collegamento indiretto: in questo caso i dati vengono scambiati tra BIM e programmi strutturali utilizzando formati indipendenti dalla piattaforma, in particolare lo standard aperto IFC sviluppato da buildingSMART, nell'approccio openBIM.

«Per applicare adeguatamente l'approccio openBIM è innanzitutto necessario che i software siano in grado di importare ed esportare il formato IFC. Successivamente è necessario scegliere la versione IFC tra quelli disponibili così come per l'MVD. È importante ricordare che la combinazione di IFC e MVD influenza fortemente i dati contenuti nel file, e in questo caso potrebbe dare come output un modello strutturale completamente sbagliato. Questo tipo di scambio è detto indiretto, neutrale e aperto perché è indipendente dai software utilizzati.»<sup>31</sup>

Somaini J., (2021), rileva che nella maggior parte dei lavori di ricerca analizzati è previsto l'utilizzo del formato IFC, tra cui IFC2x e IFC2x2, ma le versioni più utilizzate sono la IFC2x3 e la IFC4. Per quanto riguarda la scelta dello standard MVD, il più frequente è il Coordination View 2.0, ma anche il Reference View è abbastanza utilizzato.

---

<sup>30</sup> Application Programming Interface (API), è quell'insieme di procedure atte a risolvere uno specifico problema di comunicazione tra diversi computer, tra diversi software o tra diversi componenti di software. Le API sono il metodo con cui le librerie software vengono usate per effettuare uno specifico problema di scambio di informazioni (Fonte: Martin Reddy, (2011), API design for C++, Morgan Kaufmann, ISBN 978-0-12-385004-1, OCLC 704559821).

<sup>31</sup> Somaini J., (2021). BIM Interoperability in the Structural Engineer Workflow: State-of-the-art from a Literature Review [MSc thesis]. Politecnico di Milano.

In alcuni lavori di ricerca vengono utilizzati MVD non certificati, tra cui: Design transfer view, Structural Analysis e Architectural Coordination. Gli ultimi due sono MVD forniti in Sap2000 sia per IFC2x3 che per IFC4 ma, non essendo chiaro cosa includano questi MVD, si presume che corrispondano allo *Structural Analysis View* e alla *Coordination View 2.0* in IFC2x3, nonché ai sottoinsiemi strutturali ed architettonici della vista di riferimento per IFC4. Viene rilevato che, sotto l'aspetto degli standard IFC e MVD, gli studi analizzati presentano alcune lacune, riducendo la coerenza dei risultati ottenuti nelle ricerche, in quanto la tipologia di file IFC o MVD influenza fortemente gli output ottenuti nell'interscambio.

L'autore rileva altresì che è molto diffuso l'utilizzo dei link diretti, in particolare nel caso dello scambio tramite API. Software come Revit e Tekla hanno spinto l'utilizzo di questo approccio grazie alla distribuzione aperta delle relative API. In alcuni casi, a causa della mancanza di strumenti adeguati all'esportazione IFC, alcuni autori utilizzano formati diversi come CIS/2, STD o DWG.

Nell'analisi condotta, **Somaini J. (2021)** rileva che le ricerche analizzate presentano obiettivi di interoperabilità diversi e seguono diversi approcci. Gli obiettivi di interoperabilità, riscontrati negli studi analizzati, sono stati classificati in:

- *BIM to BIM*: in cui lo scambio del modello strutturale avviene tra due strumenti di BIM Authoring;
- *BIM to FEM*: in cui vi è uno scambio dati bidirezionale tra il modellatore BIM e il software di analisi strutturale;
- *FEM to FEM*: in cui lo scambio di dati avviene tra due software di calcolo strutturale.

La maggior parte dei lavori di ricerca analizzati si concentra sulla connessione tra *BIM to BIM* e *BIM to FEM* (Somaini J., 2021).

Per effettuare un'analisi strutturale è necessaria la costruzione del modello di calcolo, il quale può essere creato sia nel software BIM che nel programma FEM. Il modello di calcolo deve essere completato con tutti i dati non grafici necessari nel contesto dell'analisi strutturale, come la proprietà dei materiali, i carichi e i vincoli. Le informazioni necessarie alla computazione possono essere aggiunte dopo il trasferimento del file, dal programma BIM a quello FEM. Tale aspetto dipende principalmente dai software utilizzati, infatti, non tutti i software di BIM Authoring consentono l'inserimento queste informazioni, in particolare le versioni più vecchie di questa tipologia di software.

Nella maggioranza dei lavori analizzati da Somaini J., (2021) la progettazione del modello geometrico avviene in ambiente BIM, e successivamente il modello viene esportato nei software di calcolo FEM, garantendo maggiore flessibilità e i migliori strumenti di modellazione che sono presenti nel software BIM Authoring, rispetto a quelli presenti nel modellatore di analisi strutturale FEM.

Title	Authors	Year	Type
Interoperability in practice: Geometric data exchange using the IFC standard	Pazlar et al.	2008	Article
Benchmark tests for BIM data exchanges of precast concrete	Jeong et al.	2009	Article
The Rosewood experiment - Building information modeling and interoperability for architectural precast facades	Sacks et al.	2010	Article
BIM model analysis on a structural design perspective	Silveira Azevedo	2014	Article
Current State of Information Exchange between the two most popular BIM software: Revit and Tekla	Nizam et al.	2015	Article
From BIM to FEM: the analysis of an historical masonry building	Crespi et al.	2015	Article
The effect of interoperability between BIM and FEM tools on structural modeling and analysis.	Drávai et al.	2016	MSc thesis
BIM Software Capability and Interoperability Analysis	Taher	2016	MSc thesis
View of Data interoperability assessment though IFC for BIM in structural design – a five-year gap analysis	Muller et al.	2017	Article
Building information modeling (BIM) collaboration from the structural engineering perspective	Shin	2017	Article
Interoperability analysis of ifc-based data exchange between heterogeneous BIM software	Lai et al.	2018	Article
BIM Interoperability for Structure Analysis	Ren et al.	2018	Article
From Architectural Design to Structural Analysis: A Data- Driven Approach to Study Building Information Modeling (BIM) Interoperability	Aldegeily et al.	2018	MSc thesis
Evaluation of Interoperability in Construction Programs Using the IFC 4 State of The Art	Quintero	2018	MSc thesis
Analysis of the interoperability from BIM to FEM	Beirnaert et al.	2018	MSc thesis
Improvements for the workflow interoperability between bim and fem tools	Birkemo et al.	2019	Article
Aspetti di interoperabilità nella digitalizzazione di infrastrutture esistenti con metodologia BIM: il caso studio del ponte Balbis di Torino	Maddaluno	2020	MSc thesis
Assessment of model-based data exchange between architectural design and structural analysis	Sibenik et al.	2020	Article
Investigation of data sharing in the Structural Engineering domain	Rafeequl	2020	MSc thesis
Web-Based Tool for Interoperability among Structural Analysis Applications	Shoieb et al.	2020	Article
BIM interoperability in structural analysis	Atia	2021	MSc thesis

**Tabella 4 - Articoli di ricerca analizzati da Somaini J., 2021.**

Le modalità di scambio più frequenti, riscontrate nei lavori analizzati, sono:

- trasferimento unidirezionale: il modello segue un processo lineare passando da un software ad un altro software diverso. Questo approccio viene utilizzato per rilevare i problemi legati all'interoperabilità del modello ed è principalmente efficace nella valutazione dell'affidabilità del collegamento tra due programmi distinti;
- trasferimento bidirezionale: il modello viene prima esportato in un secondo software e poi reimportato in quello iniziale formando un circuito di tipo circolare. Questo metodo è particolarmente indicato per indagare il livello di efficienza del collegamento diretto tra software e dà la possibilità di trasferimento bidirezionale delle informazioni;
- auto-trasferimento: il modello viene esportato, in formato IFC, e reimportato immediatamente nella stessa applicazione. In questo modo è possibile osservare direttamente se il processo filtra alcune informazioni importanti allegate al modello. Esso si configura nel caso di visualizzazione e di controllo di un file con un software di visualizzazione o di “*clash detection*” di terze parti.

Nei lavori di ricerca considerati da Somaini J., 2021, la modalità di trasferimento presente in tutti i casi è quella del trasferimento in una sola unidirezionale, gli scambi bidirezionali vengono approfonditi poco in letteratura. Questo risultato dimostra un forte interesse nello scambio di informazioni tra un software e un altro, anche se lo scambio bidirezionale risulterebbe di maggiore interesse nel workflow ciclico architettonico-strutturale, il quale rappresenta il vero scopo della metodologia BIM.

La maggior parte dei ricercatori fa utilizzo di visualizzatori IFC nei propri lavori, riflettendo la necessità di controllare visivamente il modello prima dell'importazione.

La dimensione e la complessità del modello influenzano fortemente l'interoperabilità, in coerenza con il fatto che una maggiore quantità di dati implica la possibilità di avere molti più errori, carenze o distorsioni. Nelle ricerche analizzate da Somaini J. 2021 (Tabella 4), in molti casi vengono analizzati modelli BIM complessi e solo in alcuni casi vengono analizzate strutture semplici.

Per quanto riguarda i risultati dell'analisi dei materiali, è emerso che la situazione più considerata in ambito di ricerca è quella del calcestruzzo gettato in opera, viene analizzato anche il caso delle strutture in acciaio, e solo alcuni studi prendono in considerazione strutture in muratura, in legno e prefabbricate.

Somaini J., 2021, riscontra che in quasi la metà delle ricerche analizzate (Tabella 4) non è possibile una ripetibilità dello stesso test condotto dagli autori, a causa di una o più omissioni nel lavoro di ricerca. «Il problema più importante consiste nell'assenza di informazioni sulle versioni IFC e MVD utilizzate nei lavori, in quanto sono stati spesso omesse o non adeguatamente indicate. A causa dell'omissione di tali informazioni, non è facile capire se i cattivi risultati siano legati ad un basso livello di conoscenza degli strumenti software, o ad un basso livello di interoperabilità intrinseca del software. Il caso degli MVD è molto rilevante, infatti, a causa della loro azione di “filtraggio”, possono escludere elementi o proprietà essenziali nella procedura di analisi strutturale, azione che potrebbe condurre l'autore ad errate conclusioni sul software»<sup>32</sup>.

A seguire, vengono analizzate alcune ricerche sull'attuale stato dell'arte fino ad oggi, partendo da alcuni lavori analizzati già da Somaini J., 2021, selezionando i lavori di ricerca più recenti disponibili che includono analisi di interoperabilità BIM to FEM e quelle che prendono in considerazione analisi di strutture in calcestruzzo armato.

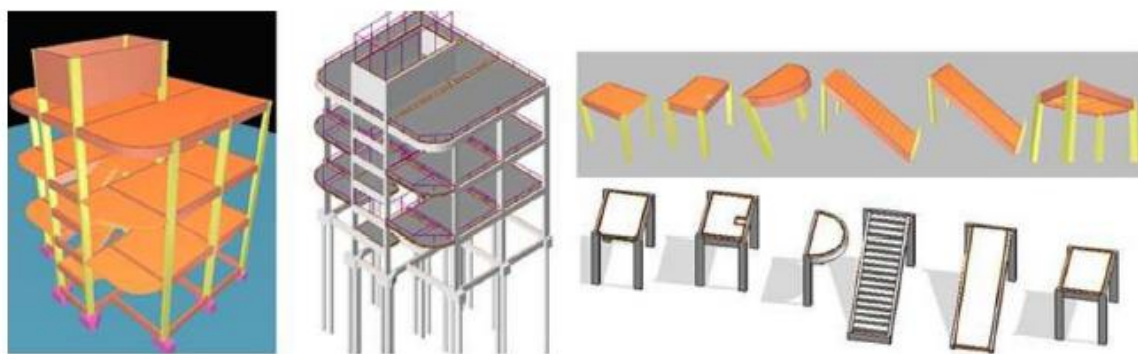
Nel **2017**, **Muller et al.** presentano un'analisi del gap quinquennale (2011-2016) dell'interoperabilità BIM-to-BIM e BIM-to-FEM, utilizzando scambio dati mediante il formato IFC in una versione non specificata dagli stessi autori. Per condurre l'analisi utilizzano il software di BIM Authoring Revit e il software di analisi strutturale TQS<sup>33</sup>. In questo lavoro vengono considerati soltanto elementi in calcestruzzo gettato in opera. In particolare, le strutture prese in considerazione sono: travi, colonne, solai, scale, rampe (scale e rampe sono incluse nella categoria solai), e un edificio a tre elevazioni (Figura 2.9).

---

<sup>32</sup> Somaini J., (2021). BIM Interoperability in the Structural Engineer Workflow: State-of-the-art from a Literature Review [MSc thesis]. Politecnico di Milano.

<sup>33</sup> TQS è un software di analisi strutturali per edifici in cemento armato. Il software consente la progettazione strutturale, l'analisi strutturale, il dimensionamento e il dettaglio delle armature, la generazione di disegni e relazioni di calcolo nel rispetto dei requisiti delle norme tecniche ABNT. Il software consente di generare modelli strutturali compatibili all'interno di un processo BIM.





**Figura 2.9 - Esempi di modelli generati nel Software REVIT e nel Software TQS (Muller et al., 2017).**

Per ciascuna tipologia di struttura i parametri che vengono analizzati sono: le proprietà dei materiali, la geometria, le griglie ed il posizionamento degli oggetti.

Nei test viene eseguito un percorso di auto-trasferimento del file, seguita dal trasferimento del modello nell'altro software. Infine, viene riesportato in IFC in entrambi i software e confrontato in un visualizzatore IFC.

Nel 2011 il software TQS non era in grado di importare file IFC, così che gli utenti dovessero importare i file di riferimento tramite sistemi CAD. I risultati sono ottenuti mediante un controllo visivo dei modelli.

I trasferimenti sono contrassegnati come completi, incompleti e parziali. Vengono attribuiti punteggi in un sistema simile ad una scala Likert: 1 per completo, 0,5 per parziale e 0 per incompleto. Successivamente viene calcolata una media coinvolgendo tutte le caratteristiche di ciascun elemento (Tabella 5).

Table 1. Results from the first experiments

OBJECT	GUID	PLACEMENT	GEOMETRY	MATERIAL	TOTAL
COLUMNS	0.583	0.667	0.500	0.383	0.537
BEAMS	0.618	0.667	0.513	0.538	0.583
SLABS	0.583	0.633	0.578	0.525	0.580
TOTALS	0.595	0.656	0.530	0.482	0.567

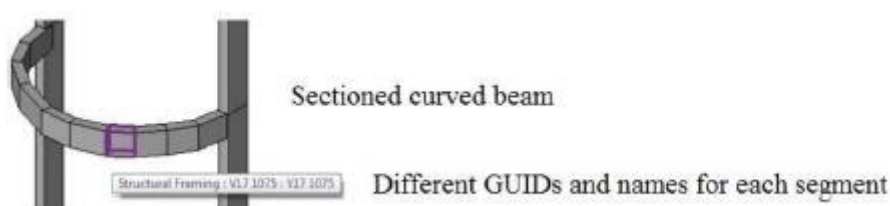
Table 2. Results from the second experiments (2016)

OBJECT	GUID	PLACEMENT	GEOMETRY	MATERIAL	TOTAL
COLUMNS	0.780	0.800	0.740	0.800	0.780
BEAMS	0.767	0.967	0.767	0.733	0.809
SLABS	0.800	0.933	0.733	0.583	0.762
TOTALS	0.782	0.900	0.747	0.705	0.784

**Tabella 5 - Punteggi di interoperabilità ottenuti, per ogni categoria di elemento, nel gap di 5 anni (Muller et al., 2017).**

Gli autori spiegano che nella seconda fase dell'esperimento, condotta 5 anni dopo, è stata osservata una certa evoluzione nell'estensibilità e nell'adattabilità in tutti e quattro gli elementi analizzati.

Un problema comune riscontrato durante i trasferimenti era legato alla geometria di alcuni elementi strutturali come curve, travi inclinate e altre geometrie complesse. Questi oggetti strutturali sono stati frammentati in più elementi, perdendo la loro struttura originaria e creando quindi nuovi codici guida (Figura 2.10). Il modello dovrebbe considerare la sovrapposizione degli elementi, in quanto non soltanto risulti geometricamente più fedele alla realtà, ma probabilmente impedirebbe anche al programma di creare una nuova guida per ciascuna sezione dell'elemento strutturale.



**Figura 2.10 – Trave curva frammentata in piccole parti (Muller et al., 2017).**

Da questo studio si evince che, in un intervallo di 5 anni, considerando il punteggio medio complessivo delle valutazioni, si sia registrato un miglioramento totale di circa il 38% (considerando una media di 0,567 per la prima analisi e di 0,784 per la seconda), e che, per quanto riguarda il trasferimento di informazioni dei materiali, i test non hanno presentato risultati soddisfacenti.

**Lai et Deng**, nel **2018**, hanno analizzato lo scambio di dati utilizzando il formato IFC, di cui non specificano la versione, considerando i software di BIM Authoring: Archicad<sup>34</sup>, Tekla Structures<sup>35</sup> e MagiCAD<sup>36</sup> per Revit.

In questo lavoro vengono effettuati diversi test di interoperabilità per le diverse discipline (Figura 2.11), tra cui uno in ambito strutturale, analizzando una trave in calcestruzzo armato.

---

<sup>34</sup> ArchiCAD è un programma BIM Authoring sviluppato da Graphisoft.

<sup>35</sup> Tekla Structures è un software BIM sviluppato da Trimble, in grado di modellare strutture che incorporano diversi tipi di materiali da costruzione, tra cui: acciaio, cemento, legno e vetro.

<sup>36</sup> MagiCAD è un plug-in che si integra al software Revit che offre una serie di funzioni di modellazione per diverse discipline MEP ed esegue calcoli integrati al suo interno.

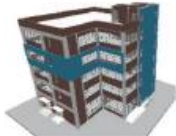


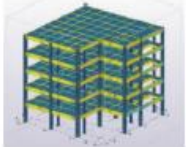


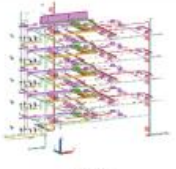


Test model	Test object	
 Architecture	 Object 1: Wall	 Object 2: Window
 Structure	 Object 3: Beam	 Object 4: Reinforcing bars
 MEP	 Object 5: Pipeline	 Object 6: Terminal

Figura 2.11 – Oggetti testati per l'esperimento di interoperabilità (Lai et Deng, 2018).

Il modello viene implementato in Tekla Structures e poi esportato in formato IFC. Questi modelli IFC esportati vengono importati in Archicad, MagiCAD for Revit e in una piattaforma IFC. Successivamente i modelli ottenuti vengono riesportati nuovamente in formato IFC e importati in SMV<sup>37</sup>, un visualizzatore IFC tramite il quale vengono analizzate le differenze (Figura 2.12).

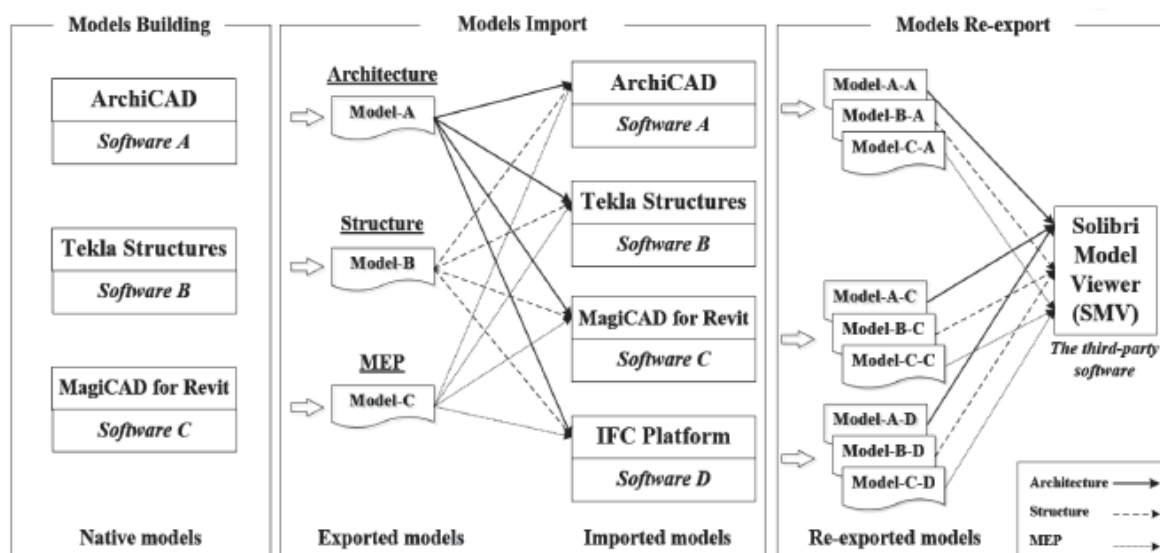


Figura 2.12 – Workflow esperimento di interoperabilità dei dati per lo scambio di dati IFC tra software BIM (Lai et Deng, 2018).

<sup>37</sup> Solibri Model View (SMV) è un visualizzatore gratuito di modelli IFC.

Dai test condotti si rileva che, per mezzo dell'ispezione visiva, le rappresentazioni geometriche del Modello B nei quattro software erano le stesse dei modelli originali dopo l'esportazione (Figura 2.13a). Una volta riesportato un modello si sono ottenute differenze significative nelle dimensioni dei file, nelle entità IFC e negli insiemi di proprietà. Inoltre, nel modello MagiCAD for Revit non era presente alcuna entità *IfcBeam* o *IfcReinforcingBar* (Figura 2.13b). Un altro aspetto interessante è costituito dalla dimensione del file del modello Archicad, la quale risulta notevolmente aumentata (+19388,4%) (Figura 2.13c).

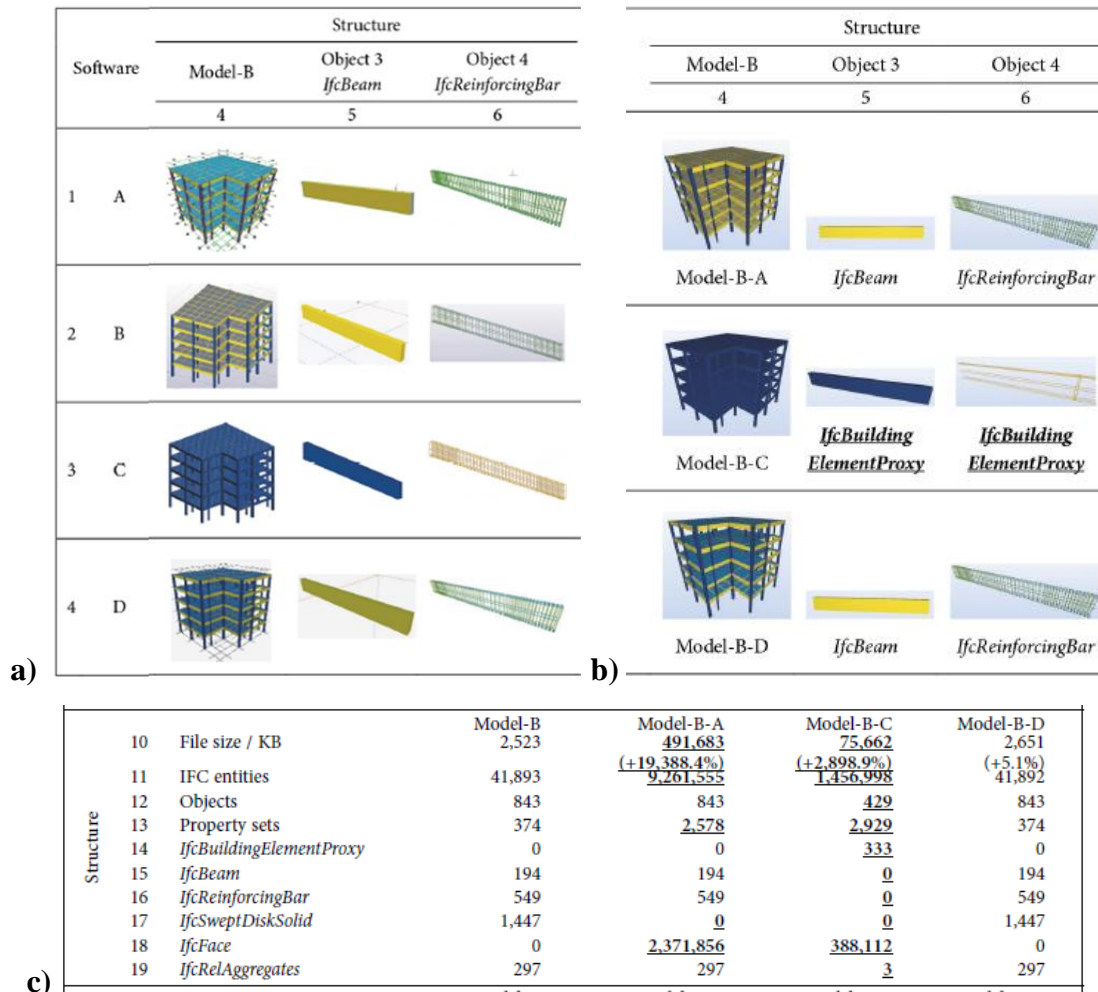
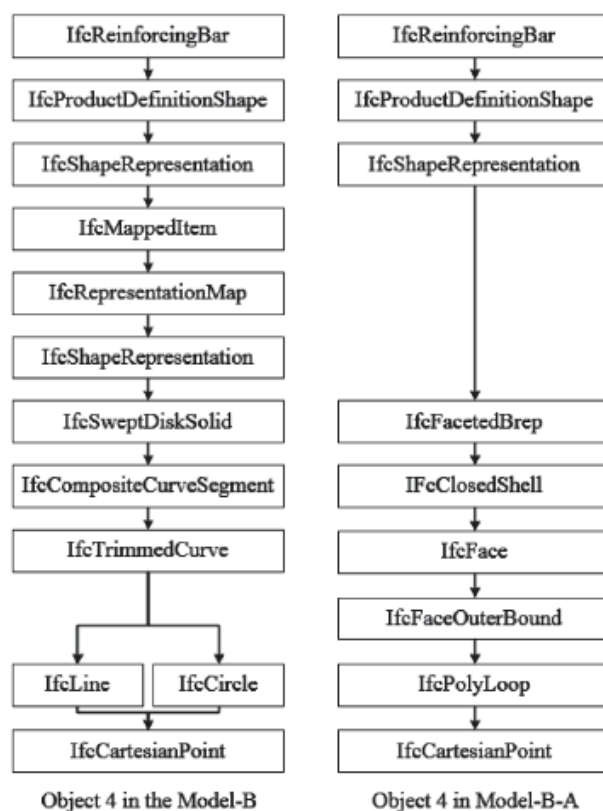


Figura 2.13 – a) Importazione del modello Tekla Structure negli altri software utilizzati nel test; b) Riesportazione dei modelli in SMV; c) Dati di confronto dopo la riesportazione (Lai et Deng, 2018).

Sebbene le entità degli oggetti IFC generate da diversi strumenti software siano coerenti, le loro rappresentazioni geometriche possono differire dall'originale. L'entità oggetto IFC per le barre d'armatura nel Modello-BA era *IfcReinforcingBar*, uguale a quello originale, sebbene la geometria rappresentata da *IfcSweptDiskSolid* sia stata convertita con *IfcFacetedBrep* nel modello BA.

Entrambi i metodi *IfcSweptDiskSolid* e *IfcFacetedBrep* possono essere utilizzati per gestire la geometria delle barre d'armatura, il metodo *IfcFacetedBrep* risulta però essere più complesso (Figura 2.14).




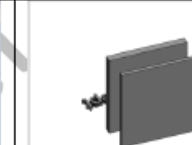


**Figura 2.14 – Diversa rappresentazione geometrica delle barre d'armatura nel formato IFC dovuta al trasferimento dei dati (Lai et Deng, 2018).**

In più, come si vede nella tabella in figura 2.13c, l'entità *IfcFace* non è stata trovata nel Modello B: il passaggio al modello Modello BA ha generato 2.371.856 nuove entità *IfcFace*. Questo ha comportato una netta differenza nella dimensione del file tra Modello B e Modello BA. Anche nel Modello-BC la rappresentazione geometrica delle barre d'armatura era rappresentata da *IfcFacetedBrep*, ma sono state create solamente 388.112 nuove entità *IfcFace*, che spiega il perchè solo una parte delle barre d'armatura sia stata visualizzata nel Modello BC. Nel modello BC i nomi degli elementi vengono rappresentati in modo errato e l'informazione sul il peso totale delle barre d'armatura viene perduto. Di particolare interesse è altresì la relazione tra oggetti in calcestruzzo e barre d'armatura, ad essa fa riferimento *IfcRelAggregates*. Si evidenzia un'enorme differenza, nel modello MagiCAD (BC) in cui sono presenti solo 3 entità *IfcRelAggregates*; invece, nel modello Archicad (BA) il numero è 297, così come il modello Tekla originario (B). Gli autori concludono che secondo i punteggi medi totali nei criteri scelti per i test di interoperabilità,

la geometria e la proprietà danno i risultati migliori tra i criteri scelti, il colore e la relazione invece presentano i punteggi inferiori.

**Ren et al., (2018)** hanno condotto dei semplici esperimenti per valutare lo scambio di dati BIM to FEM, attraverso il formato IFC di versione non specificata. Il file creato su Revit 2018 viene esportato e poi importato in diversi software di analisi strutturale, tra cui: Robot Structural Analysis, ETABS e SAP2000, per condurre l'analisi strutturale. Vengono utilizzati quattro tipi di oggetti in acciaio (trave, colonna, soletta e muro) di cui non specificano la classe di materiale (Figura 2.15).

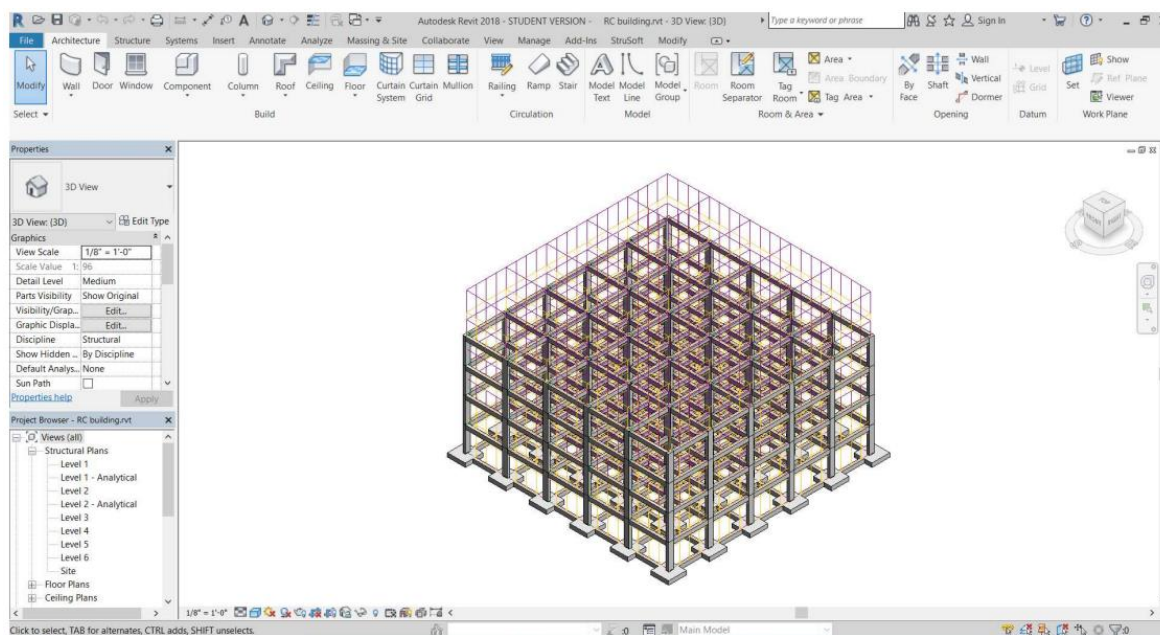
Entities	1 Ifc Beam	1 Ifc Column	18 Ifc Slabs	2 Ifc walls
Original file in Autodesk Revit 2018				

**Figura 2.15 – Elementi in acciaio utilizzati per l'analisi di interoperabilità (Ren et al., 2018).**

Durante tale processo di importazione/esportazione, i ricercatori riscontrano alcuni problemi che non hanno consentito il trasferimento delle informazioni. Nelle esportazioni/importazioni da Revit a Robot i ricercatori osservano quanto Robot non riesca a leggere le informazioni sui materiali dai file IFC. Negli altri casi di esportazione/importazione rilevano che è necessaria una corretta mappatura delle proprietà del materiale e della sezione. Gli autori rilevano anche che nell'esportazione/importazione IFC non è neanche possibile caricare le informazioni generali sui carichi e le condizioni al contorno.

**Aldegeily M., nel 2018,** propone un'analisi completa dell'interoperabilità considerando tre tipi di scambio di dati BIM-to-FEM: tramite collegamento diretto tramite file nativo, tramite collegamento diretto tramite API e tramite collegamento indiretto utilizzando una versione non specificata di IFC. In questo lavoro vengono testati un telaio in cemento (Figura 2.16) e uno in acciaio. Il modello BIM è stato creato su Revit 2018, mentre le analisi strutturali sono state effettuate con diversi programmi FEM (Robot Structural Analysis, ETABS, SAP 2000, STAAD Pro, SAFE, RISA 3-D) effettuando diverse tipologie di esportazione per ogni software.

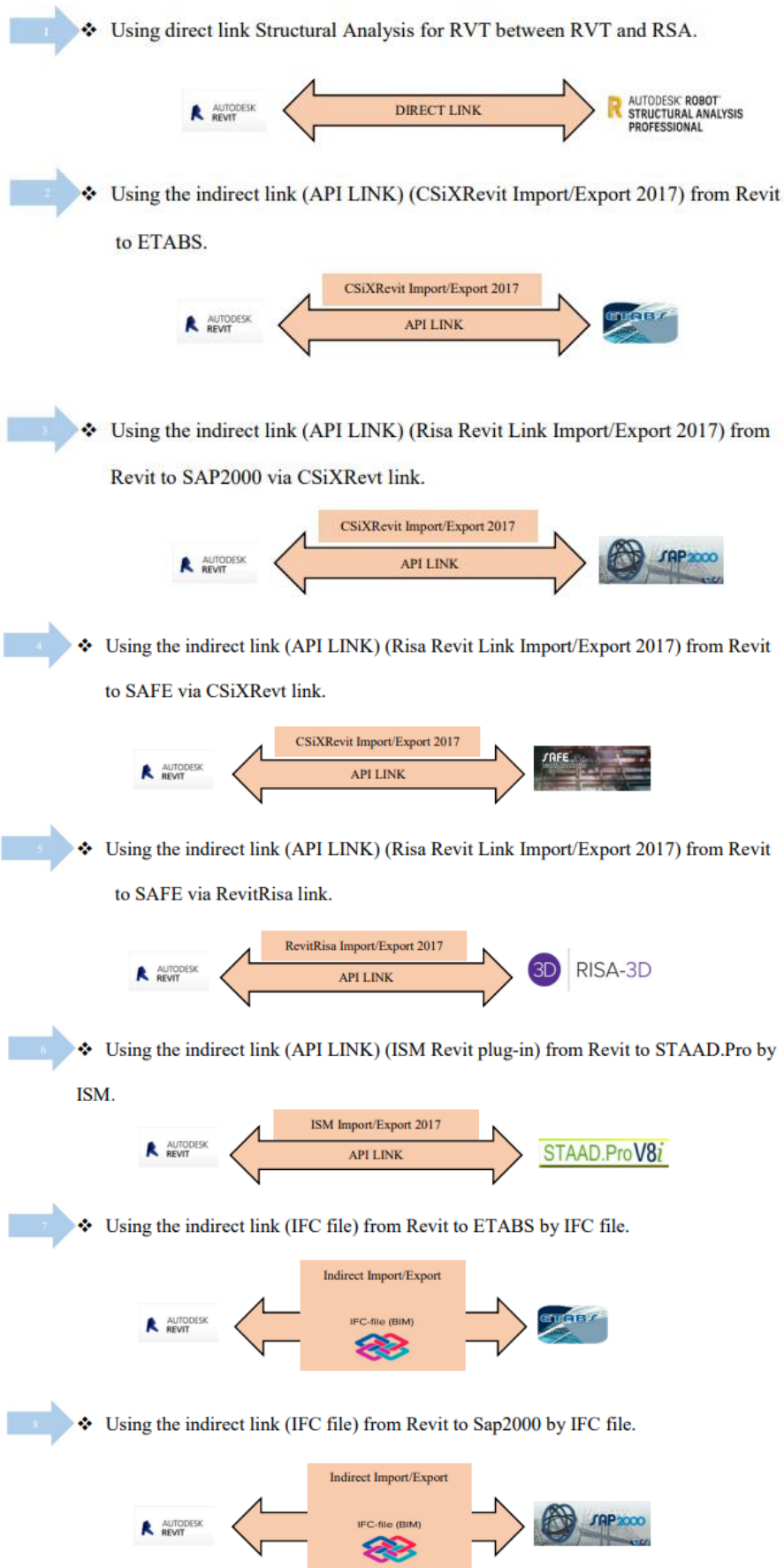




**Figura 2.16 – Struttura in c.a. creata per l'analisi (Aldegeily M., 2018).**

In qualsiasi combinazione proposta (Figura 2.17), l'autore rileva informazioni mancanti al trasferimento del file, di cui si riportano i risultati ottenuti per la sola struttura in cemento armato (Tabella 6).

I risultati mostrano che, i valori di diverse proprietà del materiale come il modulo di elasticità, il modulo di taglio, il rapporto di Poisson e il coefficiente di dilatazione termica vengono modificati durante il trasferimento dei dati. Anche il peso proprio non è presente nello scambio. Le proprietà della sezione del calcestruzzo come l'area e il momento di inerzia non vengono trasferite. I risultati peggiori si ottengono nello scambio tra Revit e SAFE, in cui quasi tutte le informazioni vengono perse. Il problema principale riscontrato dall'autore è circoscritto nel trasferimento dei dati utilizzando il collegamento indiretto tramite IFC, oltre che la perdita dell'informazione sul carico di peso proprio e delle condizioni al contorno, nonché le combinazioni di carico. Nei risultati del trasferimento dei dati tramite IFC si osservano anche proprietà di instabilità del modello e valori di rigidità totalmente errati. Nel trasferimento IFC vengono mantenute soltanto alcune proprietà geometriche della sezione. L'esperimento condotto, in tutte le combinazioni software e relativi metodi di trasferimento, ha portato a riscontrare dati mancanti nel trasferimento. L'utilizzo di un metodo indiretto di trasferimento tramite IFC ha mostrato il maggior numero di informazioni perse.



**Figura 2.17 – Combinazioni software e metodi di scambio usati per il test (Aldegeily M., 2018).**



Exchange Data scenario	1	2	3	4	5	6	7	8
<b>1-Section properties</b>								
Height $h$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Width $b$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Section Area $A$	×	×	×	×	×	×	×	×
Moment of inertia ( $I_y$ )	×	×	×	×	×	×	×	×
<b>2-Geometry</b>								
Length ( $L$ )	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×	×
Position of analytical	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×	×
<b>3- Material properties</b>								
Concrete compression	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×	×
Modulus of elasticity ( $E$ )	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×	×
Shear modulus ( $G$ )	✓	✓	✓	✓	✓	×	×	×
Density	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Poisson's ratio	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×	×
Thermal expansion	×	×	×	×	×	×	×	×
<b>4-Loads</b>								
Self-weight	×	×	×	×	×	×	×	×
Concentrated force	✓	✓	✓	✓	✓	×	×	×
Distributed force	✓	✓	✓	✓	✓	×	×	×
Load combinations	✓	✓	✓	✓	✓	×	×	×
<b>5-Boundary Conditions</b>								
Pinned	✓	✓	×	✓	✓	×	✓	×
Roller	✓	×	×	×	✓	×	×	×
Fixed	✓	×	×	×	✓	×	×	×

- (✓): The exchange of information is correct.
- (×): The exchange of information is Missing.
- (×\*): The transfer of information change value or type.

**Tabella 6 - Risultati dei test di trasferimento dati per la struttura in c.a. proposta (Aldegeily M., 2018).**

**Beirnaert et Lippens** nel loro lavoro di tesi del **2018** hanno analizzato l'interoperabilità BIM-to-FEM, di un caso semplice di trave sia in acciaio, sia in calcestruzzo armato.

Per l'analisi sono stati utilizzati diversi approcci: tramite collegamento diretto tramite file nativo, tramite collegamento diretto tramite API e tramite collegamento indiretto utilizzando sia IFC2x3 in Coordination View 2.0 che IFC4 in Reference View.

Sono stati utilizzati molti software, sia di BIM Authoring (BIM Revit, Tekla Structure, Archicad, AECOSim Building Designer e Vectorworks) sia per le analisi FEM (Robot Structural Analysis Pro, STAAD Pro, ETABS, SCIA Engineer, FEM-Design e RFEM) (Tabella 7).

Available links						
from\ to	RSA	SCIA Engineer	Staad.Pro	ETABS	RFEM	FEM-design
Revit	Direct	Direct/ IFC2x3	ISM	CSI/ IFC4	IFC2x3	StruXML
ArchiCAD	IFC2x3	IFC2x3	IFC2x3	IFC2x3/ IFC4	IFC2x3	IFC2x3
AECOsim	IFC2x3	IFC2x3	ISM	IFC2x3/ IFC4	ISM	IFC2x3
Tekla Structures	IFC2x3	IFC2x3	IFC2x3 trough ISM	IFC2x3	IFC2x3	IFC2x3
Vectorworks	IFC2x3	IFC2x3	IFC2x3 trough ISM	IFC2x3/ IFC4	IFC2x3	IFC2x3

**Tabella 7 – Modalità di trasferimento possibili tra i software utilizzati nell'analisi (Beirnaert et Lippens, 2018).**

In tutti i casi, tranne nell'abbinamento Revit-SCIA Engineer con trasferimento IFC2x3, non è possibile esportare l'armatura dal software BIM Authoring al software FEM. Inoltre, è stato possibile verificare che il modello analitico è sempre posto al centro dell'elemento, riscontrando dunque delle coordinate quasi sempre diverse nel trasferimento.

Di seguito è riportata la tabella relativa al caso in c.a. per il solo software di analisi Robot (Tabella 9). Per una corretta lettura dei risultati ottenuti viene riportata anche la leggenda proposta dagli stessi autori (Tabella 8). Considerando il collegamento con Robot, non si riscontrano problemi nel trasferimento delle informazioni geometriche per le diverse combinazioni software BIM Authoring. La lunghezza del modello, la rotazione della sezione trasversale e le coordinate globali sono le stesse in entrambi i modelli. Tutte le altre caratteristiche, relative alle proprietà del materiale, alle condizioni di vincolo, ai carichi, vengono falsate o non vengono trasferite. Solo alcune proprietà, che non vengono trasferite, vengono successivamente ricalcolate dal software di destinazione dopo il trasferimento.

Questo risultato risulta soddisfacente, in quanto anche il solo trasferimento corretto delle proprietà geometriche, dal modello architettonico a quello strutturale, rende il processo di progettazione più veloce. Tuttavia, il limite di questa analisi sta nel campione utilizzato, in quanto non sono analizzate i trasferimenti di informazioni dei possibili collegamenti tra i diversi elementi e la quantità di dati trasferiti risulta essere molto ridotta per poterne apprezzare i limiti.

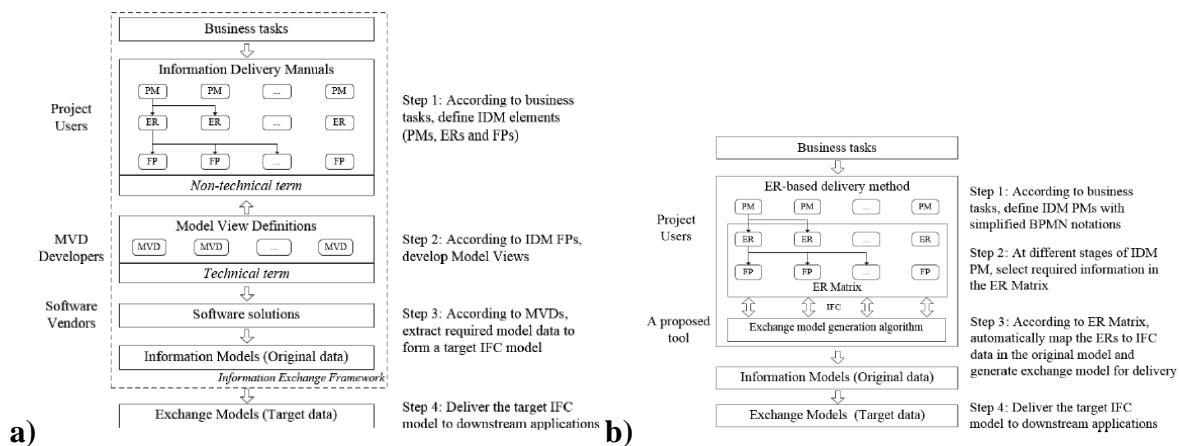
Legend	
V	The properties are correctly transferred from BIM to FEM.
A	The properties are not transferred, but defined by the FEM-software.
X	The properties are not transferred/ have an incorrect value.
D	The default value of the FEM-software is assigned to this property
C	The property cannot be defined in the BIM-software. The FEM-software creates the correct value based on other properties.
O	The property can be defined in the BIM-software, but not in the FEM-software.
	The property cannot be found in both software programs.

**Tabella 8 - Legenda per la lettura dei risultati (Beirnaert et Lippens, 2018).**

Robot Structural Analysis: Concrete					
BIM-program	Revit	ArchICAD	AECOSIM	Tekla Structures	Vectorworks structural element
Transfer	Direct link	IFC 2x3	IFC 2x3	IFC 2x3	IFC 2x3
<b>Section properties</b>					
Profile name	C	X	X	X	X
Profile type	V	V	V	V	V
Height	A	V	V	V	V
Width	A	V	V	V	V
Centroid horizontal	A	C	C	A	C
Centroid vertical	A	C	C	A	C
Section area	A	C	C	A	C
Reinforcement number	X			X	
Reinforcement position	X			X	
Reinforcement shape	X			X	
Reinforcement diameter	X			X	
Hook at the start/ end	X			X	
Bending radius	X			X	
Concrete cover	X			X	
Moment of inertia strong axis	A	C	C	A	C
Moment of inertia weak axis	A	C	C	A	C
Elastic modulus strong axis	A	C	C	A	C
Elastic modulus weak axis	A	C	C	A	C
Torsional moment of inertia	A	C	C	A	C
Torsional modulus				O	
Warping constant				O	
Shear area strong axis				O	
Shear area weak axis				O	
Radius of gyration				O	
<b>Geometry</b>					
Length	V	V	V	V	V
Rotation of the axes (local)	V	V		X	V
Global coordinates	V	V	V	V	V
<b>Material properties concrete</b>					
Name material	V	X / D	X / D	X / D	X / D
Class (steel/ concrete/ ...)	V	V / D	V / D	V	V
Behaviour (elastic/ isotropic)	O	O			
Characteristic cylinder strength	D	D	D	D	D
Characteristic cube strength	O				
Secant modulus of elasticity	A	D	D	D	D
Poisson's ratio	A	D	D	D	D
Density	A	D	D	D	D
Yield strength	O				
Tensile strength	O				
Thermal dilatation coefficient	A	D	D	D	D
<b>Material properties steel</b>					
Name material	X			X	
Class (steel/ concrete/ ...)	X			X	
Yield strength	X			X	
Tensile strength	X			X	
Secant modulus of elasticity	X			X	
Poisson's ratio	X			X	
Shear modulus	X			X	
Density	X			X	
Thermal dilatation coefficient	X			X	
<b>Boundary conditions</b>					
Boundary conditions type	V			X	
Supports: state	V			X	
Degrees of freedom	V			X	
<b>Loads</b>					
Self-weight	V			X	
Concentrated force	V			X	
Distributed force	X			X	
Load cases	V			X	
Load combinations	V			X	
Safety factor	V			X	

Tabella 9 – Risultati di trasferimento dati, ottenuti nei test con Robot (Beirnaert et Lippens, 2018).

Nel 2019, Lai et al., nel loro lavoro di ricerca, propongono un metodo di trasferimento dei dati basato su requisiti di scambio (ER), al fine di migliorare la consegna delle informazioni di progettazione strutturale. Nello studio è stata sviluppato un workflow di progettazione strutturale basato sull'Information Delivery Manual (IDM) (Figura 2.18b). All'interno di questa mappa del processo, è stata proposta una matrice ER di progettazione strutturale al fine di definire le informazioni richieste da altre discipline in fasi diverse. Questa matrice era composta da una serie di oggetti strutturali richiesti e dai relativi attributi, che sono stati mappati sui dati IFC (Industry Foundation Classes) correlati. La mappatura tra la matrice ER e i dati del modello strutturale basato su IFC è stata implementata da un algoritmo di generazione del modello di scambio.



**Figura 2.18 – a) Workflow di trasferimento delle informazioni, basato su IDM e MVD; b) Workflow delle informazioni migliorato basato sui requisiti di scambio definiti dall'utente (Lai et al., 2019).**

## STEP 1

Il primo passo per il trasferimento di informazioni è quello di definire gli elementi chiave dell'IDM in base alle attività aziendali, come la mappa dei processi (PM), requisiti di scambio (ER) e le parti funzionali (FP). Una PM utilizza la Business Process Modeling Notation (BPMN) per definire il flusso di processo per un compito particolare, comprese le attività, i partecipanti e i modelli di scambio. In questa prima fase, si utilizza una PM definita secondo notazioni BPMN semplificate, proponendo una PM per la progettazione strutturale relativa agli edifici civili, attraverso la revisione della letteratura ed interviste ad esperti del settore dell'ingegneria civile (Tabelle 10 e 11).

	Activity	Task
S.1	Conceptual structural design	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Determine structural type (such as steel structure, concrete structure, and composite structure) according to the description and scope of the building project;</li> <li>– Determine structural system (such as frame structure and shear wall structure) according to the height, function, and structural type of the building project;</li> <li>– Determine spatial arrangement of beams, columns, walls, slabs, and supports according to the structural system of the building project.</li> </ul>
S.2	Conceptual structural design review	– Check the structural type determined at the conceptual design stage, and ensure its validity.
S.3	Preliminary structural design	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Determine antiseismic requirements;</li> <li>– Determine structural loads;</li> <li>– Determine strength grade of materials;</li> <li>– Determine cross-sectional dimensions of structural components;</li> <li>– Complete the basic selection and preliminary settings;</li> <li>– Build the preliminary design model.</li> </ul>
S.4	Preliminary structural design review	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Check the rationality of antiseismic information, load information, and member section at the preliminary design stage;</li> <li>– Check structural layout at the preliminary design stage.</li> </ul>
S.5	Detailed structural design	<p>Based on the preliminary design model, the structural engineer builds the detailed model in terms of detailed information at this stage:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– For the steel structure, structural joints between components and local stiffening measures are designed in detail after selecting the section of stressed members;</li> <li>– For the concrete structure, when determining the section of members, member reinforcements and local structure measures need to be identified. A large number of structural joints in the building project are designed in detail.</li> </ul>
S.6	Detailed structural design review	– Check the detailed structural model and related drawings, and review the validity of reinforcements and structural joints.
S.7	Structural model for BIM collaboration	– Deliver the structural model for BIM collaboration between multiple disciplines.

**Tabella 10 - Compiti per diverse attività nella mappa dei processi (PM) per la progettazione strutturale (Lai et al., 2019).**

Detailed structural design (S.5)	
Task	<p>Based on the preliminary design model, the structural engineer builds the detailed model in terms of detailed information at this stage:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– For the steel structure, structural joints between components and local stiffening measures are designed in detail after selecting the section of stressed members;</li> <li>– For the concrete structure, when determining the section of members, member reinforcements and local structure measures need to be identified. A large number of structural joints in the building project are designed in detail.</li> </ul>
Analysis	Structural analysis, such as the analysis for reinforcements and structural joints.
ER	Build a detailed structural model (S_ER.2), including the foundation, reinforcements, and structural joints.

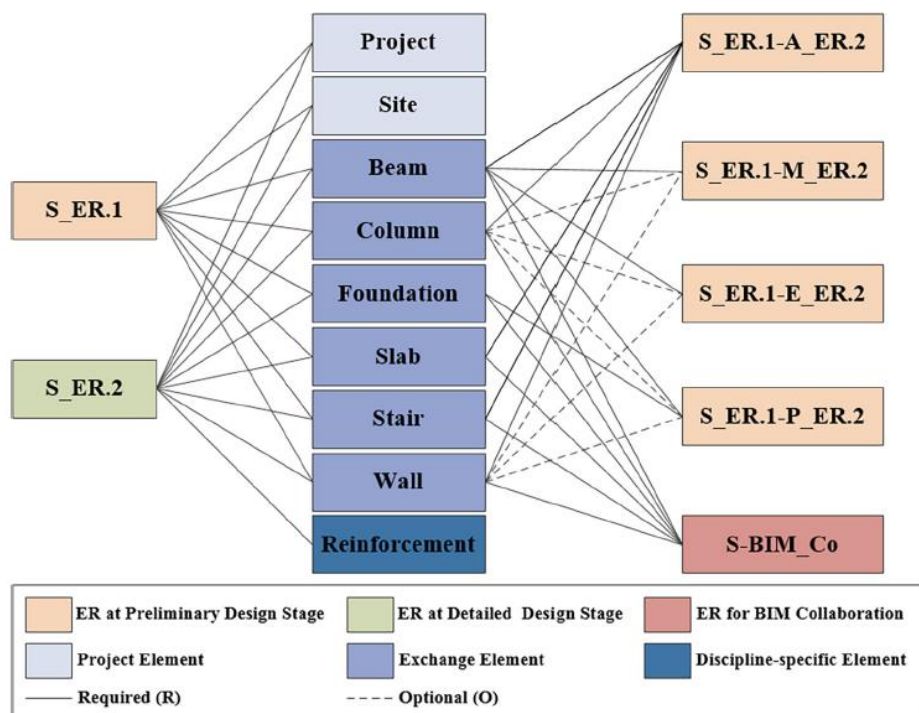
**Tabella 11 - Specifiche del processo nella progettazione strutturale dettagliata (Lai et al., 2019).**

## STEP 2

Gli sviluppatori MVD devono definire le entità/attributi IFC uno per uno per formare un MVD corrispondente. Per migliorare l'efficienza delle definizioni ER, i ricercatori stessi, propongono un esempio di matrice ER per la progettazione strutturale (Figura 12). Gli utenti possono definire gli oggetti e gli attributi richiesti in base ai diversi ER dei progetti di costruzione (Figura 2.19).

	S_ER.1								S_ER.1-A_ER.2								S_ER.2								S-BIM.Co											
	Project	Site	Beam	Column	Foundation	Slab	Stair	Wall	Reinforcement	Project	Site	Beam	Column	Foundation	Slab	Stair	Wall	Reinforcement	Project	Site	Beam	Column	Foundation	Slab	Stair	Wall	Reinforcement	Project	Site	Beam	Column	Foundation	Slab	Stair	Wall	Reinforcement
Designer	R	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	R	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Discipline code	R	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	R	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Geographical location	-	R	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	R	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Site type	-	R	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	R	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Investigation info.	-	R	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	R	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ID	-	-	R	R	R	R	R	R	-	-	-	R	R	-	R	R	R	-	-	-	R	R	R	R	R	R	R	-	-	R	R	R	R	R	R	-
Object type	-	-	R	R	R	R	R	R	-	-	-	R	R	-	R	R	R	-	-	-	R	R	R	R	R	R	R	-	-	R	R	R	R	R	R	-
Location	-	-	R	R	R	R	R	R	-	-	-	R	R	-	R	R	R	-	-	-	R	R	R	R	R	R	R	-	-	R	R	R	R	R	R	-
Shape	-	-	R	R	R	R	R	R	-	-	-	R	R	-	R	R	R	-	-	-	R	R	R	R	R	R	R	-	-	R	R	R	R	R	R	-
Cross section	-	-	R	R	R	R	R	R	-	-	-	R	R	-	R	R	R	-	-	-	R	R	R	R	R	R	R	-	-	R	R	R	R	R	R	-
Length/ Height/ Thickness	-	-	R	R	R	R	R	R	-	-	-	R	R	-	R	R	R	-	-	-	R	R	R	R	R	R	R	-	-	R	R	R	R	R	R	-
Material	-	-	R	R	R	R	R	R	-	-	-	R	R	-	R	R	R	-	-	-	R	R	R	R	R	R	R	-	-	O	O	O	O	O	O	-
Strength grade	-	-	R	R	R	R	R	R	-	-	-	O	O	-	O	O	O	-	-	-	R	R	R	R	R	R	R	-	-							-
Connection	-	-	R	R	R	R	R	R	-	-	-	O	O	-	O	O	R	-	-	-	R	R	R	R	R	R	R	-	-							-
Reinforcement info.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	R	R	R	R	R	R	R	-	-							-

**Tabella 12 - Esempio di matrice ER per il trasferimento di informazioni nella progettazione strutturale. Legenda: (R) informazioni richieste; (O) informazioni facoltative; (-) non si ha attributo corrispondente; (Lai et al., 2019).**



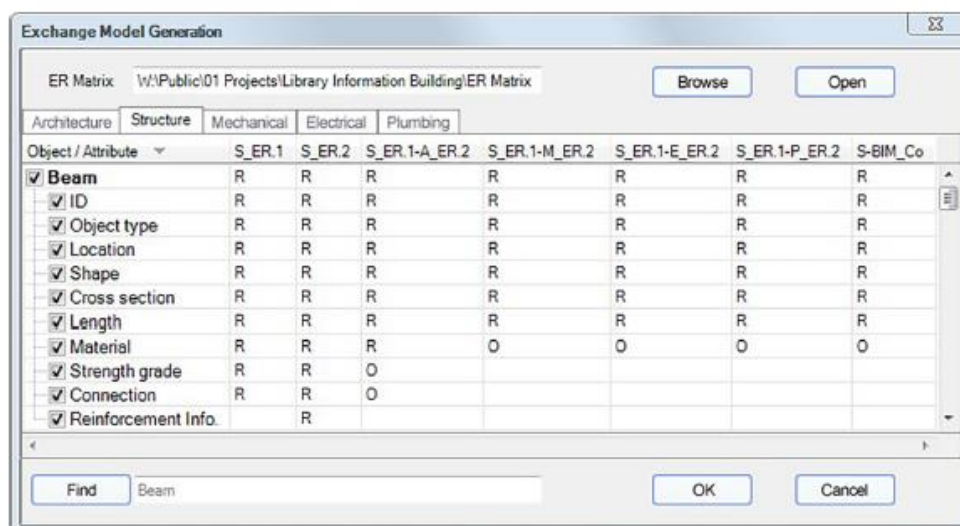
**Figura 2.19 – Oggetti strutturali per diverse esigenze di scambio (Lai et al., 2019).**

### STEP 3

Secondo la MVD definita, i fornitori di software devono sviluppare algoritmi corrispondenti per estrarre i dati del modello richiesti dai modelli nativi. Gli algoritmi possono variare a seconda dei formati di dati del software. In questo passaggio, gli ER nella matrice proposta possono essere mappati alle entità IFC correlate e ai loro attributi tramite un algoritmo basato su IFC, quindi viene generato il modello target. Gli stessi



autori propongono un algoritmo per la generazione del modello di scambio, gli oggetti richiesti e i loro attributi possono essere mappati sui dati IFC designati, evitando l'elaborazione manuale dei dati, includendo l'interfaccia utente con linguaggio basato su XML. (Figura 2.20).



**Figura 2.20 - L'interfaccia utente dell'algoritmo per la generazione del modello di scambio nella progettazione strutturale (Lai et al., 2019).**

Gli autori sottolineano che, l'algoritmo di interscambio proposto è stato creato appositamente per il lavoro di ricerca, e che potrebbe risultare necessario aggiungere più ER nella matrice per altri casi, come i requisiti di scambio aggiuntivi, le informazioni provenienti da altre discipline (ad esempio architettura) e altri tipi di progetti (ad esempio progetti infrastrutturali). Per risolvere questo problema, gli autori suggeriscono di creare una matrice esaustiva oppure un meccanismo di estensione della matrice. Tuttavia, ritengono che sia difficile stabilire una matrice completa per tutti gli ER nel settore AEC, evidenziano quanto le matrici specifiche del dominio abbiano il potenziale per supportare casi specifici.

Il lavoro di ricerca approfondisce le informazioni richieste nella matrice ER richieste per la generazione del modello IFC. Tali informazioni possono essere classificate in informazioni generali, ad esempio relativamente al progetto o al sito di costruzione, e le informazioni sugli oggetti. Si riportano a seguire alcune delle informazioni richieste nel formato IFC per rappresentare oggetti strutturali (Tabella 13) con i loro relativi attributi (Tabella 14).

Required object	IFC class (IFC2x3)	IFC class (IFC4)
Beam	IfcBeam.	IfcBeam, IfcBeamStandardCase.
Column	IfcColumn.	IfcColumn, IfcColumnStandardCase.
Foundation	IfcFooting, IfcPile.	IfcFooting, IfcPile.
Slab	IfcSlab, IfcRoof.	IfcSlab, IfcRoof, IfcSlabStandardCase, IfcSlabElementedCase.
Stair	IfcStair, IfcStairFlight.	IfcStair, IfcStairFlight.
Wall	IfcWall, IfcWallStandardCase.	IfcWall, IfcWallStandardCase, IfcWallElementedCase.
Reinforcement	IfcReinforcingBar, IfcReinforcingMesh, IfcTendonAnchor, IfcTendon.	IfcReinforcingBar, IfcReinforcingMesh, IfcTendonAnchor, IfcTendon.

**Tabella 13 - Definizioni degli oggetti richiesti nella matrice ER per la generazione del file di interscambio IFC (Lai et al., 2019).**

Required attribute	Target IFC data	Attribute value	IFC relation entity
ID	IfcRoot.GlobalId	String (22) Fixed	–
Object type	IfcObject.ObjectType	IfcLabel	–
Location	IfcProduct.ObjectPlacement	IfcLocalPlacement	–
Shape	IfcProduct.Representation	IfcShapeRepresentation	–
Cross section	IfcProfileDef	IfcPositiveLengthMeasure	–
Length/Height/Thickness	IfcExtrudedAreaSolid.Depth	IfcPositiveLengthMeasure	–
Material	IfcMaterial	IfcLabel	IfcRelAssociatesMaterial
Strength grade	IfcPropertySingleValue	IfcValue	IfcRelDefinesByProperties
Connection	IfcElement.ConnectedTo	IfcElement	IfcRelConnectsElements
Reinforcement info.	IfcElementAssembly	IfcElement	IfcRelAggregates

**Tabella 14 - Definizioni degli attributi richiesti nella matrice ER per la generazione del file di interscambio IFC (Lai et al., 2019).**

In questo studio viene anche riportato un esempio, relativo all'entità *IfcBeam* (Figura 2.21), in cui si illustra la struttura dei suoi attributi utilizzando il linguaggio EXPRESS-G. Gli autori affermano che: gli attributi di *IfcBeam* possono essere divisi in due tipi: attributi espliciti e quelli definiti da attributi inversi. Gli attributi espliciti sono interrogato direttamente dalle istanze IFC cui fa riferimento *Ifc-Beam*, inclusi ID, tipo di oggetto, posizione, forma, sezione trasversale e lunghezza; gli attributi inversi (inclusi materiale, grado di resistenza, connessione e informazioni sull'armatura) devono essere rappresentati da altre entità IFC associate tramite entità di relazione IFC. Ad esempio, il materiale della trave nella matrice ER può essere rappresentato dall'entità *IfcMaterial*, la quale è associata a *IfcBeam* tramite *IfcRelAssociatesMaterial* (come mostrato in figura 2.16). Gli attributi di altri oggetti strutturali possono essere estratti dal modello IFC attraverso un meccanismo di mappatura simile.



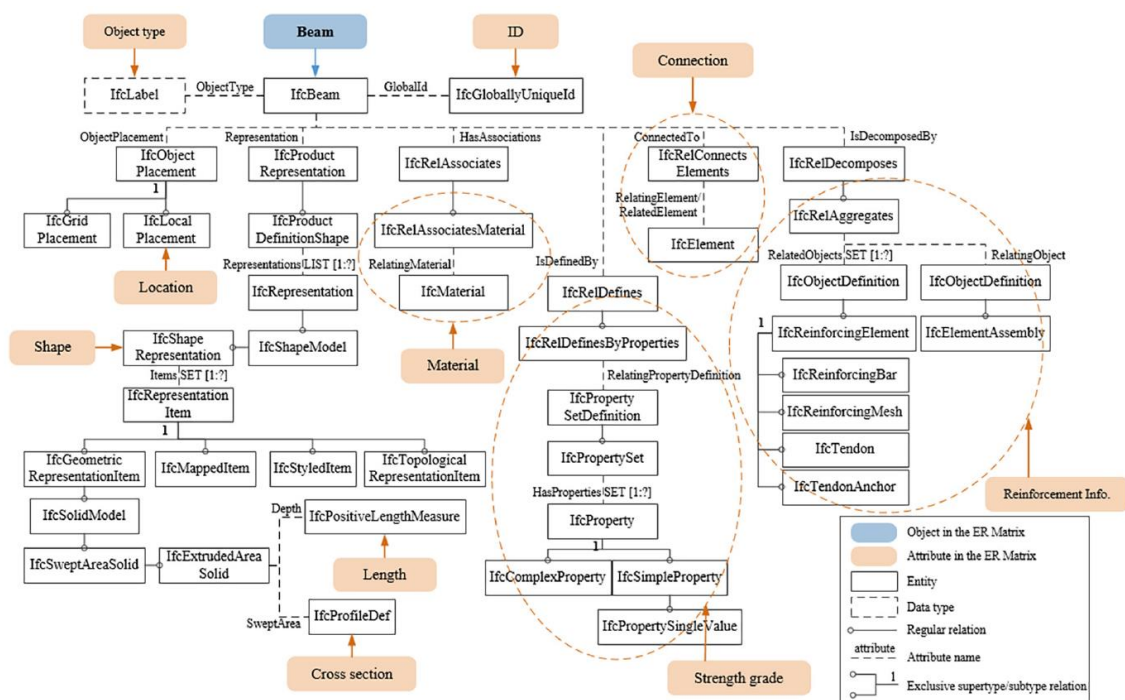


Figura 2.21 - Attributi richiesti nell'oggetto IfcBeam, nel linguaggio EXPRESS-G (IFC2x3) (Lai et al., 2019).

#### STEP 4

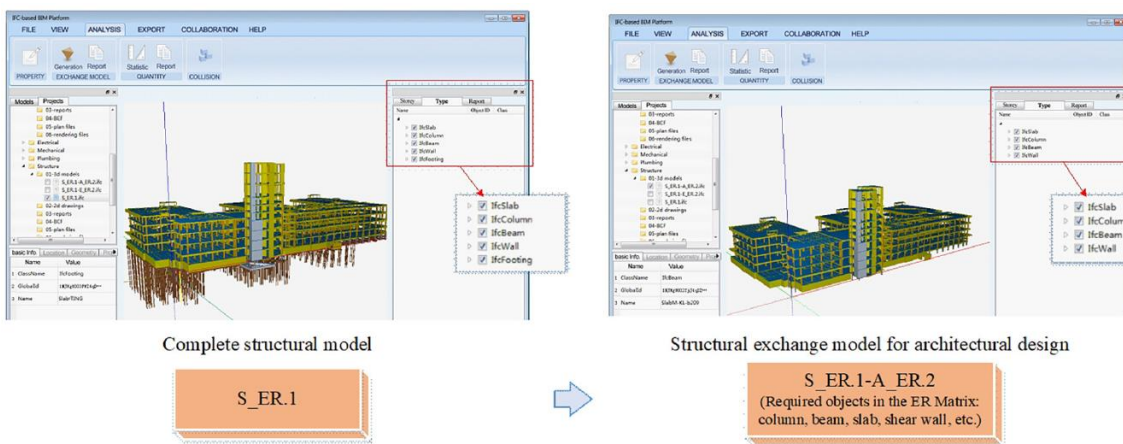
L'ultimo passaggio consiste nel trasferimento del modello IFC target, generato tramite i passaggi precedenti, al software di calcolo strutturale.

Per illustrare l'utilità del metodo proposto, **Lai et al., (2019)** propongono un caso studio all'interno del loro lavoro di ricerca. La struttura del caso studio è una biblioteca composta da due corpi di fabbrica, uno principale di 9 piani e uno di 4 piani destinato alle sale lettura. L'edificio principale è una struttura in c.a. a telaio con pareti a taglio, mentre le sale di lettura hanno una struttura a telaio in c.a. Sono stati creati tre modelli specifici per ogni disciplina: ArchiCAD (architettura), Tekla Structures (struttura) e MagiCAD (MEP). Questi strumenti software sono certificati per IFC2x3 *Coordination View 2.0*. Lo studio condotto dai ricercatori ha seguito i seguenti passaggi:

- 1) Dopo aver definito il tipo strutturale nel progetto concettuale, è avvenuto il passaggio architettonico-strutturale con modello di scambio A\_ER.1-S\_ER.1 per progettazione strutturale preliminare. L'A\_ER.1-S\_ER.1 è stato estratto automaticamente dal modello architettonico A\_ER.1. Secondo la matrice ER della progettazione strutturale preliminare, il modello strutturale S\_ER.1 è stato costruito

con travi, colonne, fondazioni su pali, solette e pareti a taglio.

- 2) Il modello S\_ER.1 è stato importato nel delivery tool per generare i modelli di scambio per altri progettisti. Secondo la matrice ER definita dall'utente, sono stati generati i modelli di scambio richiesti S\_ER.1-A\_ER.2 e S\_ER.1-M\_ER.2 (Figura 2.22), gli stessi sono stati trasmessi per la progettazione collaborativa.
- 3) Secondo il PM elaborato per questa progettazione strutturale, prima di costruire il modello S\_ER.2, era necessario importare modelli di scambio da altre discipline insieme all'attrezzatura speciale (in questo caso il carico di scaffali pieni di libri è una delle informazioni cruciali sul carico strutturale), quindi le informazioni specifiche sono state fornite per il calcolo strutturale. Successivamente è stato costruito nel dettaglio il modello strutturale S\_ER.2. I rinforzi, ottenuti dall'analisi strutturale, sono stati aggiunti in ciascun oggetto strutturale del S\_ER.2 rispetto al S\_ER.1. Inoltre, nell'S\_ER.2 secondo la matrice ER erano necessarie ulteriori informazioni e dettagli per la rappresentazione degli oggetti.
- 4) Dopo aver realizzato il S\_ER.2 nella progettazione dettagliata, il modello S-BIM.Co è stato generato dal S\_ER.2 secondo la matrice ER definita per questo caso studio. In questo progetto, il processo S-BIM.Co è stato utilizzato per la collaborazione BIM con più discipline e per la verifica delle interferenze. Di conseguenza, le richieste di modifiche progettuali sono state presentate ai relativi progettisti.



**Figura 2.22 - Requisiti per lo scambio di informazioni dalla struttura all'architettura (Lai et al., 2019).**

I risultati mostrano che il metodo proposto utilizzando IFC è vantaggioso per la fornitura di informazioni strutturali.

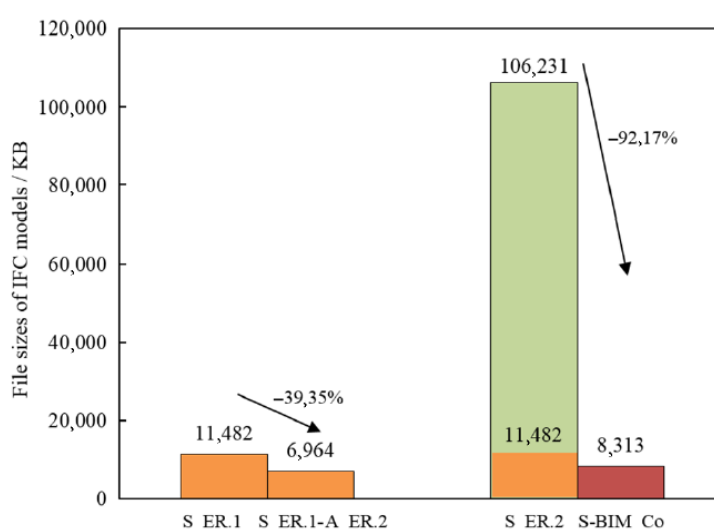
Secondo la matrice ER proposta, i file S\_ER.1- A\_ER.2 e S-BIM\_Co sono stati estratti

rispettivamente dai file S\_ER.1 e S\_ER.2. Per l'estrazione del numero degli oggetti da ogni modello (Tabella 15) è stato utilizzato l'IFC File Analyser (National Institute of Standards and Technology, 2011). I risultati mostrano che i numeri degli oggetti richiesti in S\_ER.1-A\_ER.2 e S -BIM\_Co erano corretti e gli oggetti con il simbolo "Vuoto" non sono stati trovati in S\_ER.1 e S\_ER.2. Definendo gli ER nella matrice proposta, soltanto gli oggetti strutturali richiesti sono stati estratti dai modelli strutturali originali, i quali hanno mostrato l'accuratezza del metodo di consegna proposto.

	S_ER.1	S_ER.1-A_ER.2		S_ER.2	S-BIM_Co	
	Number	Option	Number	Number	Option	Number
Beam	5,649	R	5,649	6,087	R	6,087
Column	1,299	R	1,299	1,594	R	1,594
Foundation	1,551		0	1,551	R	1,551
Slab	98	R	98	98	R	98
Wall	426	R	426	426	R	426
Reinforcement	0		0	11,337		0

**Tabella 15 - Oggetti richiesti in diversi modelli di scambio durante la consegna delle informazioni di progettazione strutturale (Lai et al., 2019).**

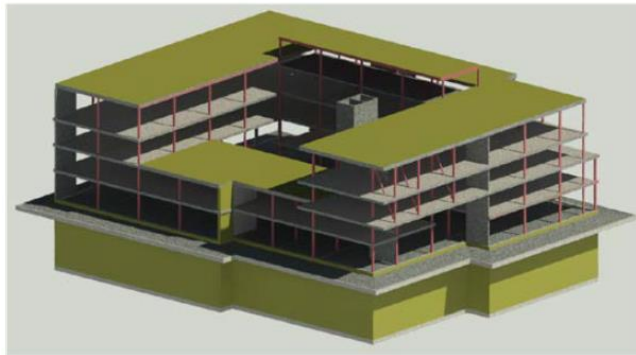
Inoltre, tale metodologia ha migliorato l'efficienza dell'interoperabilità dei dati tra ingegneri strutturali e altri progettisti. La Figura 2.23 presenta le dimensioni dei file di alcuni modelli strutturali utilizzati in questo progetto. Il file S\_ER.1-A\_ER.2, estratto da S\_ER.1, ha presentato una riduzione del 39,35% delle dimensioni del file e si è riscontrata una percentuale di diminuzione del 92,17% del file S-BIM\_Co estratto da S\_ER.2.



**Figura 2.23 - Dimensioni dei file dei modelli strutturali basati su IFC (Lai et al., 2019).**

L'S\_ER.2 di questo progetto presentava numerosi rinforzi all'interno di ciascun oggetto strutturale. A differenza dei normali oggetti strutturali, le forme geometriche delle armature erano rappresentate da numerose istanze IFC, con conseguente evidente aumento delle dimensioni del file IFC. Nel file S\_ER.2, l'armatura era rappresentata dall'entità *IfcReinforcingBar*, la cui geometria era rappresentata da *IfcSweptDiskSolid* con molti segmenti di curva composti (rappresentati da entità *IfcCompositeCurveSegment*). Tuttavia, il rinforzo non era necessario nella collaborazione BIM. Come mostrato nella Tabella 15, l'opzione dell'armatura in S-BIM\_Co risultava vuota. Attraverso lo strumento di consegna proposto, numerose armature sono state filtrate automaticamente ed è stato generato un modello leggero SBIM\_Co basato su S\_ER.2. Dopo il processo di filtraggio, S-BIM\_Co ha riscontrato una notevole diminuzione delle dimensioni del file. Al contrario, il S\_ER.1-A\_ER.2 includeva per lo più gli stessi oggetti strutturali del S\_ER.1, ad eccezione della fondazione. Di conseguenza, S\_ER.1-A\_ER.2 ha avuto una diminuzione minore delle dimensioni del file rispetto a S-BIM\_Co. In questo progetto, i modelli di scambio con gli oggetti richiesti e i relativi attributi sono stati utilizzati in modo più agevole per la progettazione collaborativa. L'architetto e l'ingegnere MEP possono importare i corrispondenti modelli di scambio in ArchiCAD e MagiCAD rispettivamente per la progettazione architettonica e MEP. Questi modelli di scambio non solo evitavano l'estrazione manuale da modelli strutturali completi, ma erano anche utili per l'elaborazione dei dati (come l'archiviazione, la gestione, la condivisione e lo scambio dei dati) di strumenti software. Se il modello con una grande quantità di informazioni irrilevanti fosse fornito per la progettazione collaborativa, ciò comporterebbe un lavoro massiccio e senza valore aggiunto.

**Birkemo et al.**, nel **2019**, propongono un'analisi *BIM-to-FEM* utilizzando collegamenti diretti, sia tramite file nativi sia tramite API. Il caso proposto in questo studio è Arkivenes Hus, ubicato a Stavanger in Norvegia, una struttura con piani interrati costituiti da solai prefabbricati in cemento, poggianti su travi e colonne prefabbricate in cemento e solai fuori terra in calcestruzzo gettato in opera poggiati su travi e pilastri in acciaio (Figura 2.24).



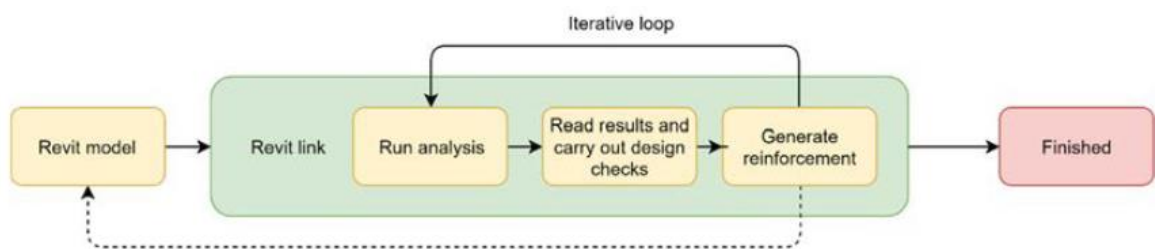
**Figura 2.24 - Modello Revit dell'edificio Arkivenes Hus (Birkemo et al., 2019).**

Il modello della struttura è stato sviluppato con il software Revit e poi trasferito a tre diversi software di analisi strutturale: Focus Konstruksjon, Robot Structural Analysis Pro e SOFiSTiK, utilizzando diversi workflow (Figura 2.25).

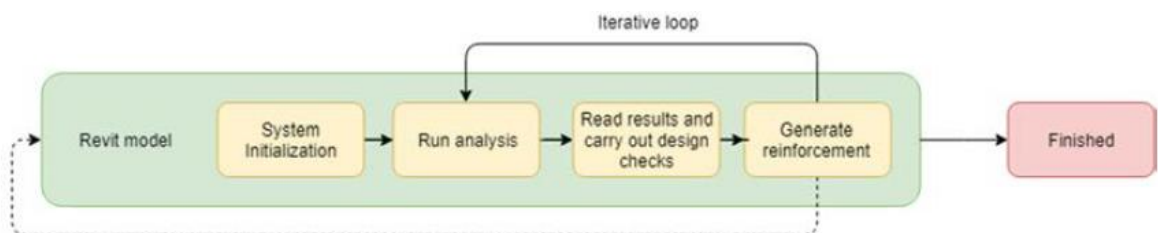
**a)**



**b)**



**c)**



**Figura 2.25 – Workflow utilizzati per l'analisi con: (a) Focus Konstruksjon; (b) Robot Structural Analysis Pro; (c) SOFiSTiK (Birkemo et al., 2019).**

Dopo il trasferimento alle applicazioni FEM, i ricercatori riscontrano molti errori geometrici, tra cui: la discontinuità nei punti di connessione (ad esempio solaio-colonna), la sovrapposizione di segmenti di linea (ad esempio sovrapposizione di lastre prefabbricate) e delle colonne continue che attraversano più piani.

Per quanto riguarda le proprietà dei materiali, i carichi e i vincoli non vengono riportate informazioni. Nello studio è illustrata una tabella con il dettaglio dei problemi riscontrati e le possibili soluzioni proposte dagli stessi autori (Tabella 16).

Workflow	Challenges	Solution
Revit to Focus	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unable to find steel cross section profiles in Focus RAT</li> <li>• Experienced instability of the model</li> <li>• Unable to export some of the structural elements due to inaccuracies in the AM</li> <li>• Discontinuity in AM</li> <li>• Missing common node in shell → line intersection</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manually define the cross-sections approximately</li> <li>• Not able to fix the problem due to software limitations</li> <li>• Manual placement of nodes</li> <li>• Manual remodelling of problematic areas</li> </ul>
Revit to Structural Robot	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unable to find some cross-section profiles</li> <li>• Instability of the model</li> </ul>	
Revit to SOFiSTiK	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Missing or dislocation of nodes</li> <li>• Missing of line intersection points</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manual placement of nodes</li> <li>• Adjusted using Analytical Check feature in the SOFiSTiK ribbon UI</li> </ul>

**Tabella 16 – Problemi e possibili soluzioni agli errori di trasferimento riscontrati (Birkemo et al., 2019).**

La situazione più affidabile, secondo i ricercatori, è quella del collegamento diretto tramite file nativo tra Revit e Robot. Tuttavia, se il modello Revit non viene modellato considerando il flusso di lavoro corretto, verificano puntualmente molti errori dopo il trasferimento agli strumenti FEM. In una seconda parte del lavoro di ricerca, viene proposto il workflow applicato dagli stessi ricercatori per la costruzione di un modello strutturale e analitico coerente, utilizzando il software Revit (Figura 2.26).

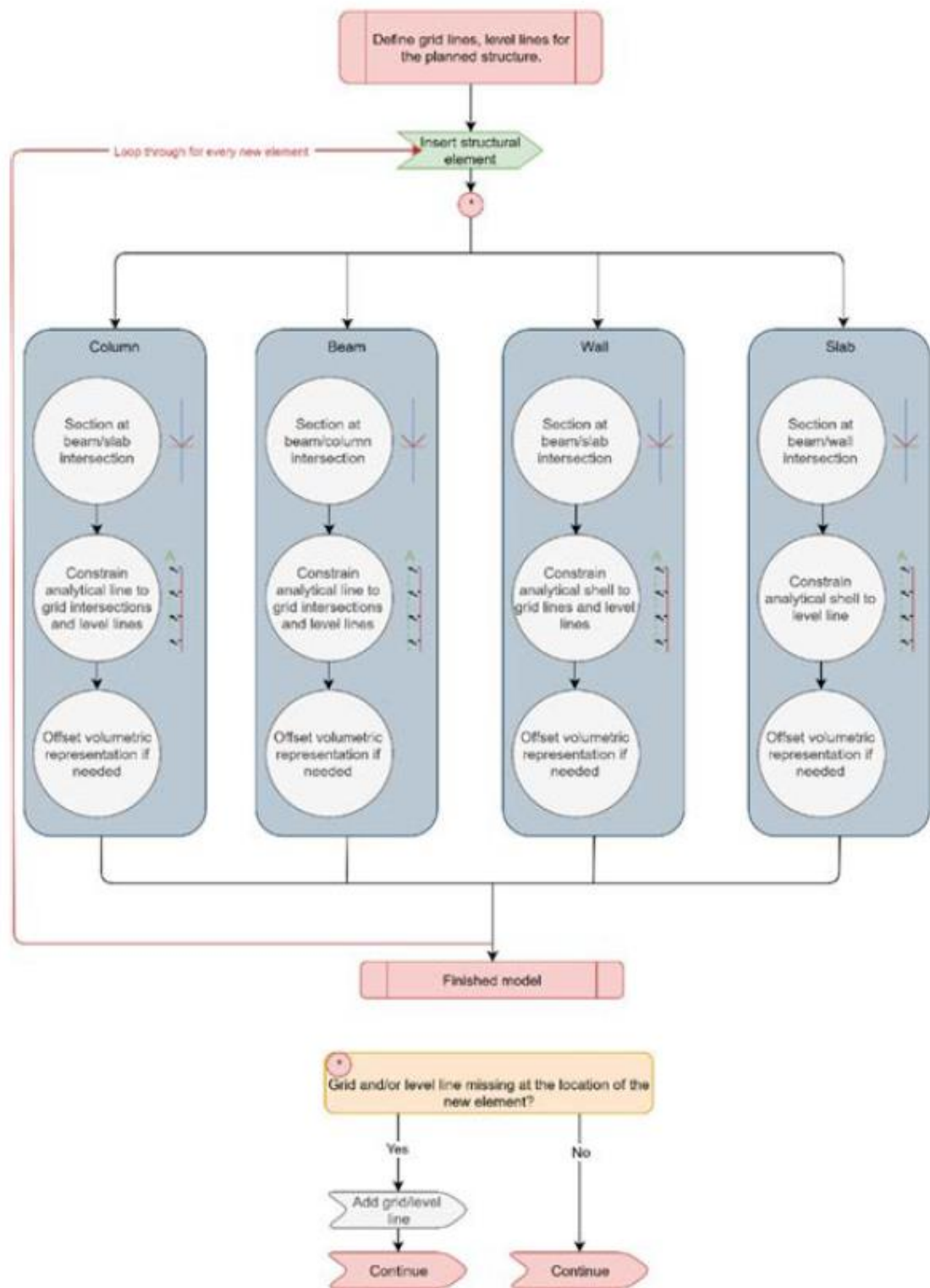


Figura 2.26 – Workflow proposto per la costruzione di modelli analiti coerenti (Birkemo et al., 2019).

Nello studio proposto da **Sibenik et Kovacic**, nel **2020**, viene approfondito lo stato della ricerca e della pratica relativa allo scambio delle informazioni nel settore AEC, attenzionando i processi che influenzano lo scambio dati su base IFC, in quanto gli stessi riscontrano che risulta essere lo standard di interscambio più utilizzato dai software



disponibili per la progettazione architettonica e strutturale.

Per mezzo di uno studio comparativo è stata testata l'interoperabilità degli strumenti software tramite file IFC aperto, cercando di comprendere le cause della perdita di informazioni nel passaggio dal modello architettonico a quello strutturale.

Nel testo viene fornita una descrizione delle tipologie di test comparativi, utilizzate dagli sviluppatori, per la valutazione dell'interoperabilità:

- test di conformità: viene eseguito quando un prodotto viene confrontato con un sistema di riferimento, come uno standard. È più probabile che gli strumenti software lavorino insieme (interoperano) con successo se entrambi sono conformi allo stesso standard. La conformità, tuttavia, non garantisce l'interoperabilità. Nei test di conformità, le possibilità di importazione ed esportazione del software sono state testate separatamente rispetto al sistema di riferimento;
- test di interoperabilità: nei test di interoperabilità del software, il comportamento di uno strumento viene testato quando interagisce con un altro prodotto. Il test di interoperabilità presenta alcuni vantaggi e svantaggi rispetto al test di conformità. Indica problemi che interessano l'utente e può affrontare situazioni che non sono definite in uno standard. Il numero di casi di test è sostanzialmente maggiore perché lo scambio di dati viene testato separatamente per ciascuna combinazione di strumenti software.

I ricercatori riscontrano che, in letteratura, i test degli strumenti software riguardanti lo scambio di dati basato su IFC si basavano su entrambi gli approcci.

Viene proposto un test di interoperabilità attraverso lo studio comparativo unidirezionale dal modello architettonico a quello strutturale. Come caso è stato riprodotto un modello della Villa Savoye di Le Corbusier, il quale presenta un sistema strutturale costituito da pareti portanti e colonne; tuttavia, solamente alcuni elementi costruttivi rappresentativi sono stati oggetto dei test di trasferimento.

I software di BIM Authoring utilizzati sono Archicad, Revit e Allplan, mentre quelli per l'analisi strutturale sono SCIA e RFEM. Per lo scambio dei dati basato su IFC state utilizzate le pratiche di generazione e scambio di dati raccomandate dai produttori dei software utilizzati.

Sebbene tutti e tre gli strumenti di BIM Authoring offrissero la possibilità di modificare le proprietà relative all'esportazione IFC di un singolo elemento di costruzione, i ricercatori non hanno modificato le proprietà assegnate di default dal software. Sono state utilizzate soltanto le impostazioni dell'interfaccia predefinite per l'esportazione dell'MVD



*Coordination View 2.0..* In questo modo sono stati esportati tre modelli di dati di costruzione IFC. Dopo la generazione delle tre varianti del modello, i file IFC sono stati importati nei due diversi strumenti software di analisi strutturale secondo impostazioni predefinite. Pertanto, lo scambio di dati è stato realizzato con un intervento minimo da parte dell'utente finale.

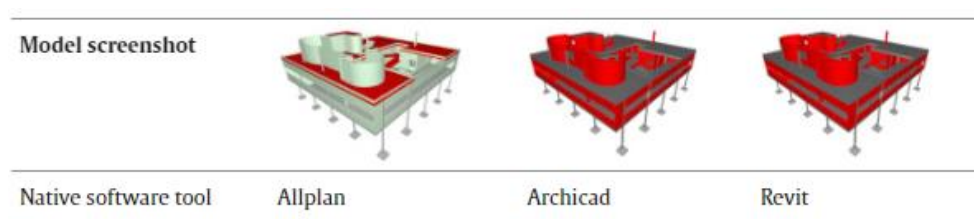
Gli autori hanno sviluppato un quadro di valutazione che include quattro interpretazioni geometriche: interpretazioni puntuali, lineari, planari e di connessione tra gli elementi. Gli elementi dell'edificio sono stati analizzati separatamente al fine di valutare la completezza del traferimento delle informazioni e le coordinate dei diversi elementi, dopo l'importazione all'interno del software di calcolo strutturale.

I risultati ottenuti nei test hanno mostrato che l'importazione e interpretazione degli elementi costruttivi è fortemente dipendente dalla combinazione software utilizzata, per quanto in nessuna delle combinazioni siano ottenuti risultati soddisfacenti.

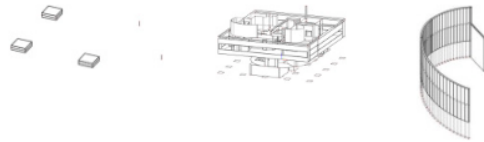
Nell'export dai diversi programmi è stato riscontrata una differenza sul numero di entità generate. I software differiscono, per i diversi elementi, nel tipo assimilazione della classe IFC (*IfcWallStandardCase*, *IfcOpeningElement*, *IfcColumn*, *IfcFooting*, *IfcBuildingElementPart*, *IfcSlab*, *IfcRoof*, *IfcStair*, *IfcDoor* o *IfcWindow*, *IfcStairFlight*), generando entità e quantità diverse in fase di esportazione.

Le incoerenze riscontrate nello studio comparativo possono essere ricondotte alle diverse entità IFC generate, tuttavia, in general nessuna tipologia di elemento ha mostrato risultati completamente soddisfacente nel traferimento delle informazioni.


In figura 2.27 vengono mostrati i modelli IFC esportati dai diversi software, la Tabella 17, invece, riporta alcune delle delle incoerenze riscontrate dai ricercatori nei software di importazione. La Tabella 18 mostra un riepilogo delle prestazioni di interoperabilità durante lo scambio di dati dal modello architettonico a quello strutturale.



**Figura 2.27 – Modelli IFC esportati dai software di BIM Authoring (Sibenik et Kovacic, 2020).**

Model screenshot			
Interpretation	Punctual interpretation	Linear interpretation	Planar interpretation (a)
Software tool combination	Revit export/RFEM import	Revit export/RFEM import	Allplan export/RFEM import
Inconsistency	Foundations interpreted as planar and linear elements instead as joints	Columns are missing	Wall interpreted as slab, offset for half of the height

Model screenshot			
Interpretation	Planar interpretation (b)	Planar interpretation (c)	Connectivity
Software tool combination	Archicad export/SCIA import	Allplan export/RFEM import	Archicad export/SCIA import
Inconsistency	Missing multi-layered walls with air layer	Axis of planar element placed on the top plane of a slab, instead of the middle	Elements lose their connectivity after being interpreted

**Tabella 17 – Problemi riscontrati nell’importazione al software di analisi strutturale (Sibenik et Kovacic, 2020).**

Interpretation Type	Building element properties			Software used for the exchange					
	Type	Number of layers	Flat (-) Tilted (/)	Archicad		Revit		Allplan	
				SCIA	RFEM	SCIA	RFEM	SCIA	RFEM
Punctual transformation	Single foundation			X	X	X	X	X	X
Linear transformation	Strip foundation			X	X	X	X	X	X
	Column (square)			✓	X	✓	X	✓	X
	Column (round)			✓	X	✓	X	✓	X
Planar transformation	Floor slab	1	/	X	X	✓	✓	X	X
		1	-					✓	✓
		2+	-	✓	✓	✓	✓		
	Slab opening	2+		✓	✓	✓	✓	✓	X
	Roof	2+	/	X	X	✓	X	X	X
		2+	-	✓	✓	✓	X	X	X
	Roof opening	2+	-	X	✓	✓	X	X	X
	Wall	1		✓	✓	✓	X	✓	X
		2+		X	X	✓	X	✓	X
	Wall opening	1		✓	✓	✓	X	X	X
	Wall opening	2+		X	X	✓	X	X	X
Connectivity				X	X	X	X	X	X

**Tabella 18 – Riepilogo prestazioni di interoperabilità per tipo di elemento (Sibenik et Kovacic, 2020).**

Nel trasferimento delle informazioni, l'interpretazione della geometria è una problematica che si verifica per diverse tipologie di elementi, in tutte le combinazioni software utilizzate. Il trasferimento delle informazioni degli elementi puntuali e della connessione tra gli elementi costruttivi non si è verificata in nessuno dei casi esaminati. I ricercatori affermano che le combinazioni software utilizzate hanno generato risultati inaspettati e imprevedibili. Ad esempio: sono stati importati nel modello strutturale anche gli elementi non strutturali, invece, alcuni elementi strutturali non sono stati importati nel modello strutturale. Altre informazioni, come la posizione degli assi o le fondazioni, sono state importate in modo tale da risultare errate negli strumenti software di analisi strutturale. Dalla constatazione di questi risultati si evidenzia che l'uso di un flusso di lavoro BIM con IFC non è ancora pienamente qualificato per soddisfare le attività di scambio di dati tra il dominio architettonico a quello strutturale.

Lo studio condotto da **Sibenik et Kovacic, (2020)**, ha approfondito anche il punto di vista normativo e regolamentare e dell'industria del software.

Sono stati anche analizzati gli standard MVD del trasferimento, facendo un confronto tra i "concept" MVD *Coordination View 2.0 (CV V2.0)* richiesti da buildingSMART (Tabella 19) e quelli presenti negli strumenti software durante il processo di certificazione del software (Tabella 20). Si osserva che, mentre le colonne vengono esportate come *Geometry sweptsolid* da Archicad e Allplan (codice concettuale 030-6-1), da Revit vengono esportate come *Geometry mapped* (030-6-9). La Tabella 21, invece, mostra come e se il "concept" è stato supportato dai software di analisi strutturale, riportando nelle colonne "importate correttamente" e "non importate correttamente" il numero di combinazioni di strumenti software in cui i risultati dell'importazione erano o non erano rappresentati correttamente nel software di analisi strutturale.

Concept code	Concept according to buildingSMART concept lists	Exchange requirement	Export relevance	Import relevance
030-6-1	Geometry sweptsolid	Column geometry	Mandatory	Mandatory
030-6-9	Geometry mapped	Column geometry	Mandatory	Mandatory
030-6-1	Geometry sweptsolid	Wall geometry	Mandatory	Mandatory
210-1	Property set IFC common	Load-bearing property wall	Mandatory	Mandatory
110-2	Connectivity path	Connectivity wall	Mandatory	Mandatory

**Tabella 19 - MVD CV V2.0 richiesti da buildingSMART (Sibenik et Kovacic, 2020).**

Concept code	Export certification		Import certification		
	Archicad	Revit	Allplan	SCIA	RFEM
030-6-1	Supported		Restricted <sup>a</sup>	Supported	Supported
030-6-9		Supported		Supported	Supported
030-6-1	Supported	Restricted <sup>b</sup>	Supported	Supported	Supported
210-1	Supported	Supported	Supported	Not tested	Supported
110-2	Restricted <sup>c</sup>	Supported	Restricted <sup>d</sup>	Not tested	Not supported

**Tabella 20 - MVD CV V2.0 presenti nei software. NOTE: Alcune geometrie nel processo di certificazione non possono essere create all'interno di alcuni software; tuttavia, queste geometrie non sono presenti negli elementi del caso studio proposto. (Sibenik et Kovacic, 2020).**

Concept code	Properly imported	Erroneously imported	Remarks when the exchange requirement is erroneously imported
030-6-1	2	2	Geometry not properly interpreted
030-6-9	1	1	Geometry not properly interpreted
030-6-1	2	4	Geometry not properly interpreted
210-1	0	6	Element not recognized by the importing tool
110-2	0	6	Property not recognized by the importing tool

**Tabella 21 - Comportamento dei “concept” nei software di analisi strutturale (Sibenik et Kovacic, 2020).**

Tra le problematiche di trasferimento, si riscontra che:

- le informazioni vengono esportate come elementi architettonici nel modello di dati dell'edificio IFC, ma non sono definite delle relazioni tra gli elementi architettonici e le rispettive rappresentazioni strutturali. Questo problema è in parte affrontato da buildingSMART attraverso gli IDM, ma non è stato considerato per il *Coordination View 2.0*, che è quello più ampiamente implementato nei software;
- un altro processo che influisce sulla qualità dello scambio di dati è la certificazione del software. L'elenco dei “concept” specifica i requisiti per i test di esportazione e importazione, sebbene possano essere obbligatori, facoltativi, non rilevanti o esclusi. Nei software oggetto del test queste descrizioni di “concept” non sono sempre rispettate, questo significa che i “concept” obbligatori non sono sempre supportati nelle liste di controllo di un software certificato.

I requisiti specifici del dominio (es. architettonico, strutturale, MEP) vengono specificati solo per i test di esportazione e gli standard secondo i quali i software sono certificati non seguono tutti lo stesso dominio e requisiti. Di conseguenza, non ci si può aspettare che tutti i “concept” siano supportati in qualsiasi software. Questo è probabilmente il motivo per cui il software viene certificato senza supportare tutti i “concept” descritti come obbligatori.

La strategia di miglioramento proposta è un nuovo processo di certificazione che possa riflettere i requisiti di scambio specifici del dominio o del software. L'esecuzione dei test di interoperabilità con lo schema aperto è un importante indicatore di usabilità per gli utenti finali, il quale dovrebbe essere chiaramente descritto in fase di certificazione dei software.

Gli standard di interpretazione inter-dominio devono essere introdotti nello schema integrato e in quello specifico del dominio, nella certificazione del software, prima che raggiungano l'utilizzatore dello stesso. I requisiti di scambio errati o mancanti vengono ricondotti a tutti e quattro i processi normativi e regolamentari.

I requisiti di scambio che non hanno fornito i risultati attesi hanno presentato problemi diversi all'interno dei processi (Tabella 22):

- alcuni requisiti di scambio vengono testati durante i processi di certificazione ma mancano ancora dopo lo scambio dei dati;
- alcuni requisiti di scambio esistono all'interno dell'MVD CV V2.0 ma non vengono testati durante la certificazione;
- alcuni requisiti di scambio esistono nello schema IFC ma non fanno parte dell'MVD CV V2.0;
- alcuni requisiti di scambio vengono trasferiti ma restituiti in modo errato dallo strumento di analisi strutturale importatore.

Problem	Process	Improvement strategy
1 Exchange requirements tested during certification, but missing in the resulting model	Regulative: Software Certification	Improved or new software tool certification that is software or domain specific
2 Exchange requirements exist in the MVD, but not tested in the software tool	Normative: Domain-specific data model	Domain-specific data models supporting the necessary exchange requirements
3 Exchange requirements not part of the integrated data model	Normative: Integrated data model	Integrated data model encompassing all domain-specific data models
4 Exchange requirements transferred but incorrectly interpreted	Normative: Inter-domain relations	Building data interpretation standards

**Tabella 22 - Problemi identificati e strategie di miglioramento proposte che influenzano l'esperienza dell'utilizzatore finale durante lo scambio di dati (Sibenik et Kovacic, 2020).**

Gli stessi ricercatori propongono una possibile strategia per il miglioramento sistematico dello scambio delle informazioni tra i software di modellazione architettonica e di analisi strutturale:

- 1) le regole di trasferimento delle informazioni mancanti devono essere sviluppate e introdotte nel workflow di scambio di dati;
- 2) i trasferimenti delle informazioni devono avvenire tra modelli specifici del dominio, supportati da modelli di informazione edilizi specifici del dominio;
- 3) i modelli delle informazioni di costruzione devono essere integrati come risultato di più modelli di informazioni di costruzione correlati e specifici del dominio;
- 4) devono essere introdotto un processo di certificazione specifico del dominio o dello strumento software.

I processi di generazione e scambio delle informazioni, certificazione e standardizzazione del software e di sviluppo di software vanno ad influenzare lo scambio delle informazioni. Tuttavia, i miglioramenti a questi processi dagli sviluppatori informatici i quali non riescono a migliorare sistematicamente lo scambio delle informazioni tra i diversi software. Il processo di certificazione influisce direttamente sullo sviluppo del software, quindi, la certificazione e la standardizzazione dei software potrebbe colmare questo divario, così da portare ad un miglioramento nello scambio di informazioni tra i diversi software.

Ad oggi, però, un software certificato testato non supporta necessariamente i requisiti di scambio degli altri software. Un unico elenco di “concept” (come CV V2.0) con alcune variazioni non può soddisfare le diverse esigenze di più domini e strumenti software. Pertanto, la certificazione degli strumenti software oggi non può essere considerata un valido indicatore di interoperabilità.

Lo standard MVD, in quanto modello di informazioni specifico di un dominio, costituisce la base per il processo di certificazione. I software che implementano l'MVD CV V2.0 non hanno la necessità di implementare ulteriori MVD specifici di un dominio, in quanto MVD CV V2.0 è supportato da più domini. Per questo motivo l'MVD CV V2.0 ha assunto un ruolo di modello integrato dei dati dell'edificio nel caso dello scambio delle informazioni tra il dominio architettonico e quello strutturale.

I modelli specifici di un dominio dovrebbero invece riflettere i concetti specifici del dominio stesso, così da poter comunicare con strumenti software specifici. Il modello integrato dovrebbe mettere in relazione i concetti inter-dominio in modo che la comunicazione tra i concetti specifici del dominio possa essere realizzata.

Gli autori ritengono che i problemi nelle interpretazioni delle informazioni, emersi in questo studio comparativo, siano state appunto dovute alle funzionalità di esportazione e importazione dei software, le quali non sono ancora correttamente standardizzate. Lo studio ha appunto dimostrato che la mancanza di standard che descrivono le relazioni tra domini, nella fase di importazione, determina risultati incoerenti dello stesso modello basato su IFC in più strumenti software.

La mancanza di standard di interpretazione inter-dominio si riflette sullo schema IFC, sulla mancanza di MVD, sull'errato processo di certificazione e, infine, sullo sviluppo del software, influenzando l'esperienza dell'utilizzatore finale.

In conclusione, i ricercatori propongono delle possibili soluzioni, al fine migliorare l'esperienza dell'utilizzatore finale dei software:

- un processo di certificazione dello strumento software migliorato o nuovo;
- dei modelli informativi multipli e specifici per ogni dominio, aggregabili su un modello informativo integrato;
- l'introduzione di regole di interpretazione nell'attuale workflow di scambio delle informazioni.

Tale miglioramento proposto richiede un approccio top-down. Innanzitutto, è necessario definire delle regole interpretative, per poi introdurle nei modelli di dominio-specifici, ed infine creare una procedura di certificazione dominio-specifica.

Questo studio proposto ha identificato i problemi procedurali più importanti e il potenziale di miglioramento che svilupperebbe sistematicamente lo scambio di dati. In particolare, gli autori considerano la mancanza di regole di interpretazione inter-dominio come il problema procedurale più critico nello scambio fluido tra il dominio architettonico e quello strutturale.

Nel **2021**, **Atia K. A.** in un lavoro di tesi, effettua un'analisi di interoperabilità tra il software di BIM Authoring Revit e diversi software di analisi strutturali: Robot Structural Analysis, Midas gen, ETABS e Sap2000. Il trasferimento dei dati avviene attraverso collegamenti diretti sia tramite file nativi che API. Come oggetto di analisi vengono presi in considerazione elementi singoli di varia forma, con struttura sia in acciaio che in c.a., nonché edifici a più piani sia in c.a. che acciaio. Nel lavoro proposto, l'autore riporta una valutazione dei risultati di trasferimento sotto forma tabellare (Tabella 23).

Revit Category	Robot Structure	Midas Gen	Etabs	Sap 2000
Grids	✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓
Levels	✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓
Material	✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓
Structural Framing	✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓
Structural Column	✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓
Structural Walls	✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓
Structural Slab	✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓
Loads	✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓
Boundary Conditions	✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓

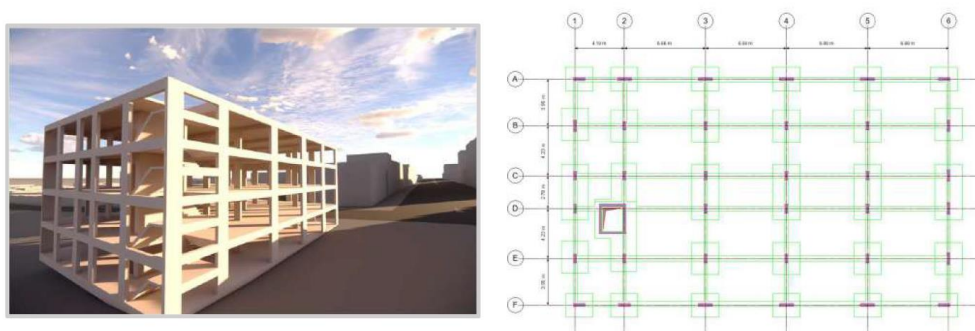
**Tabella 23 – Risultati di interoperabilità ottenuti nei test (Atia K. A, 2021).**

L'analisi dei risultati porta a constatare una buona interazione Revit-Robot, dove il trasferimento avviene attraverso il collegamento diretto tramite collegamento nativo. Uno dei problemi riscontrati in questo trasferimento dati è stato relativo al carico di superficie. Buoni risultati di trasferimento dati sono stati ottenuti tra Revit e Midas Gen, attraverso il collegamento diretto tramite API. In questo caso i problemi riscontrati sono relativi alla mancanza della condizione al contorno del muro, problemi di trasferimento delle informazioni del peso proprio e dei carichi di superficie. ETABS e Sap2000, anche se appartengono allo stesso sviluppatore di software, in questo studio mostrano risultati di



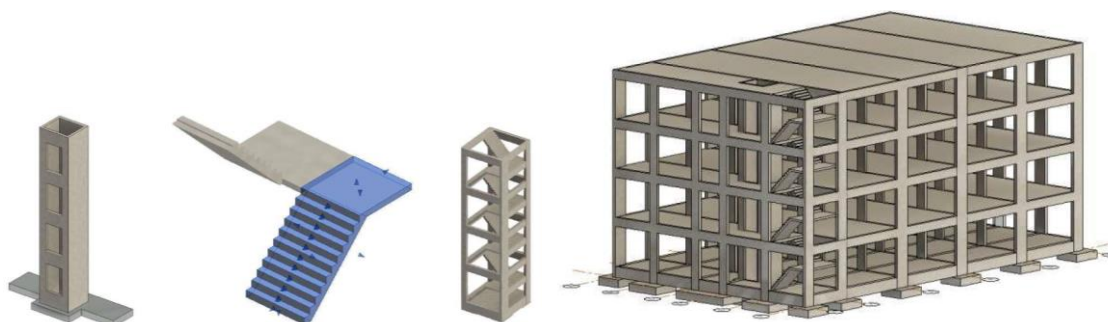
interoperabilità diversi. ETABS mostra risultati migliori rispetto a Sap2000, sebbene si riscontrino errori riguardo alla mappatura dei profili di travi e colonne e problemi di trasferimento delle informazioni del supporto per le aperture circolari e delle condizioni al contorno. Sap2000, inoltre, presenta problemi trasferimento dati relativi ai livelli, al profilo curvo, alle solette, alle pareti e condizioni al contorno.

Nel 2022, Gomes A.M. et al., hanno condotto uno studio di ricerca sull'interoperabilità Revit-Robot con metodo di scambio diretto da file nativo. Come modello per l'analisi è stato proposto un edificio residenziale di quattro elevazioni, con struttura a telaio in c.a. e fondazioni su plinti isolati (Figura 2.28).



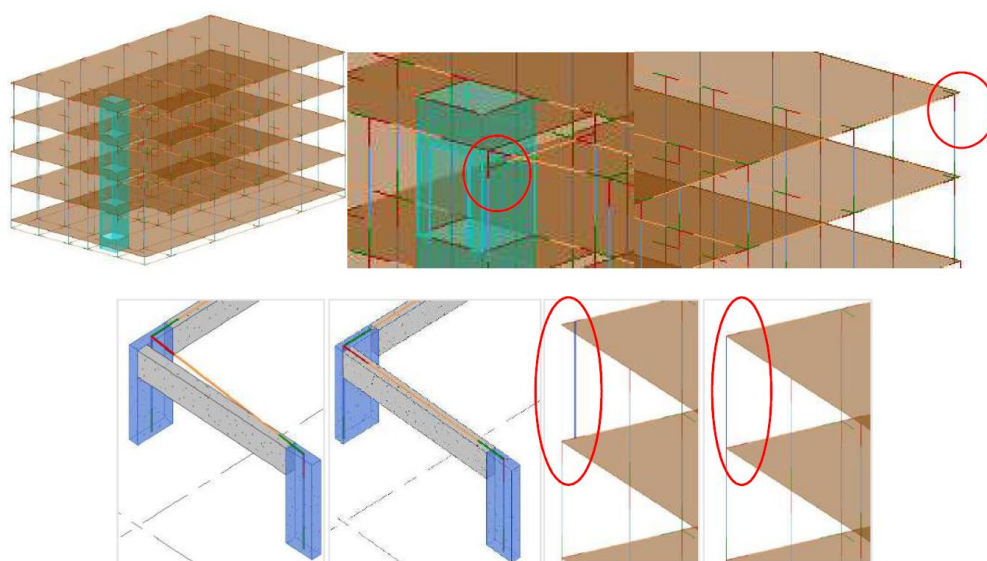
**Figura 2.28 - Edificio utilizzato ai fini dell'analisi con relativa pianta di fondazione (Gomes et al., 2022)**

Il modello 3D è stato implementato su Revit (Figura 2.29), dove sono state anche inserite le caratteristiche meccaniche dei materiali componenti. Nella versione di Revit utilizzata per questa analisi, la modellazione dell'elemento scala è stata possibile solo nella disciplina architettonica, quindi, non è stato possibile associare all'elemento strutturale della scala il rispettivo elemento analitico per il calcolo delle armature. Per superare questa limitazione del software, i ricercatori hanno modellato il telaio considerando la scala come un solaio inclinato. In una fase successiva è stato previsto l'inserimento dell'armatura manualmente, nel modello architettonico che rispecchia la reale geometria della scala.

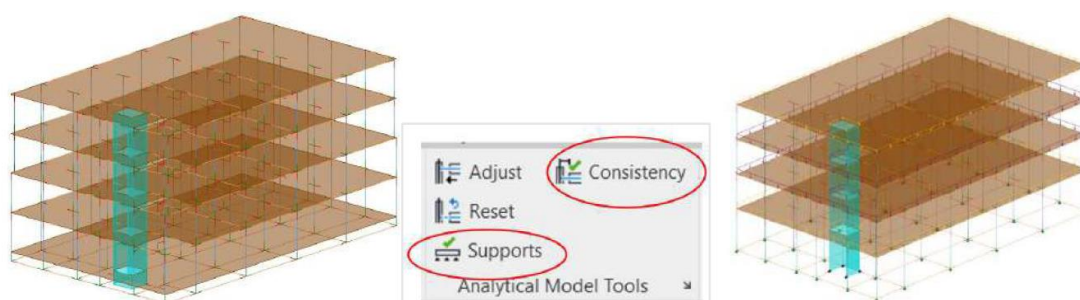


**Figura 2.29 – Modelli strutturali del nucleo degli ascensori, delle stelle e modello BIM strutturale finale (Gomes et al., 2022).**

Terminata la progettazione del modello strutturale è stato generato automaticamente da Revit il modello analitico della stessa struttura. Dall'osservazione del modello analitico ottenuto, i ricercatori hanno rilevato alcune incongruenze, tra cui, la principale è stata quella della non ortogonalità di alcuni assi del modello analitico (Figura 2.30). Questo problema si è verificato poiché la rappresentazione analitica della colonna era collocata nel suo centro geometrico che non coincide con l'intersezione dell'asse delle travi. Gli autori hanno effettuato tutti gli aggiustamenti prima dell'esportazione, verificando anche la coerenza geometrica nel modello analitico, tramite apposita funzionalità disponibile su Revit (Figura 2.31).



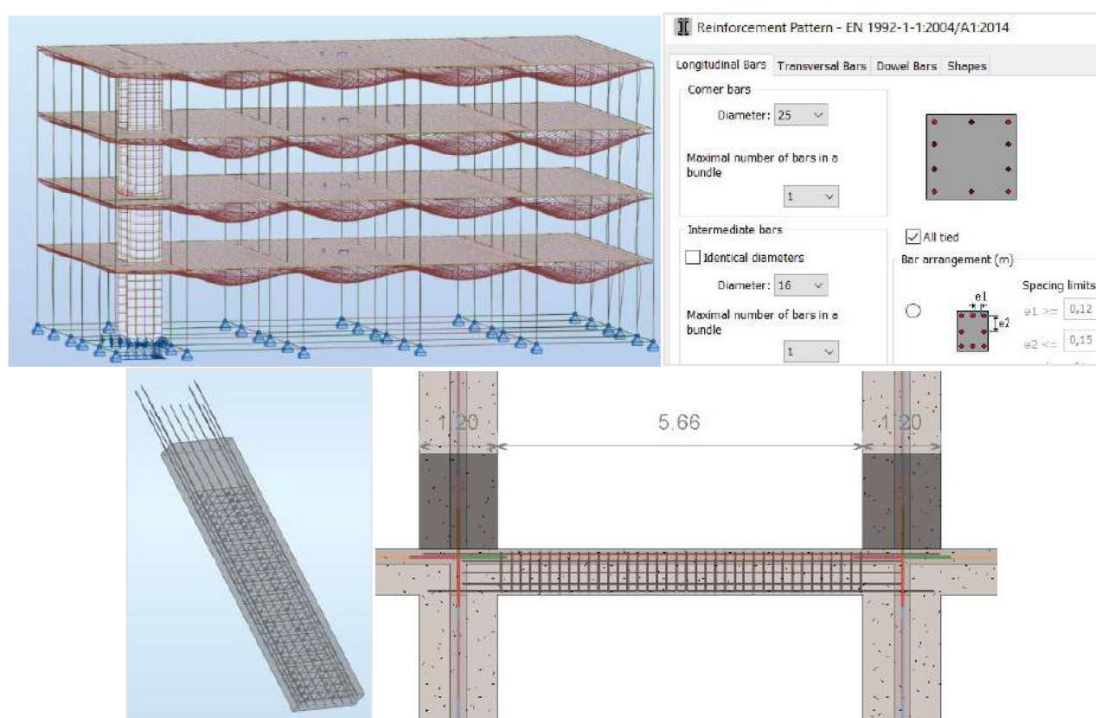
**Figura 2.30 – Errori riscontrati nel modello analitico generato automaticamente (Gomes et al., 2022).**



**Figura 2.31 – Comandi per il controllo del modello analitico (Gomes et al., 2022).**

Gli autori, dopo il traferimento del modello strutturale da Revit a Robot tramite collegamento diretto da file nativo, riscontrano che la quasi totalità delle informazioni sono state trasferite correttamente, ad eccezione del valore della rigidezza elastica del supporto elastico, che presenta valori non corretti.

L'applicazione dei carichi sulla struttura, così come le combinazioni di carichi, sono state impostate su Robot. Successivamente è stata calcolata l'armatura (Figura 2.32), seguendo due passaggi: calcolo dell'armatura minima ( $A_t$ ) e definizione dell'armatura prevista ( $A_r$ ). Nella determinazione dell'armatura prevista, i ricercatori hanno modificato diversi parametri al fine di ottenere una soluzione adeguata. In questi passaggi e modifiche i ricercatori hanno notato un'importante ottimizzazione del tempo offerta dalle potenzialità del software.



**Figura 2.32 - Diagramma della deformazione dei solai e vista dell'armatura in un pilastro e una trave su Robot Structural Analysis (Gomes et al., 2022).**

Terminata la fase di calcolo e la definizione delle armature, le stesse sono state importate su Revit. In questo passaggio è stato portato all'attenzione che:

- per quanto riguarda i solai si riscontra una capacità di interoperabilità inefficiente. Robot riesce a definire l'armatura, ma da Robot a Revit sono stati trasferiti solo i diagrammi delle sollecitazioni e l'armatura deve essere ridefinita su Revit;
- nel caso delle travi, il processo di trasferimento delle armature è efficiente;
- per quanto riguarda pilastri e fondazioni, sia l'interoperabilità che il calcolo automatico vengono entrambi eseguiti correttamente. Il trasferimento delle armature di fondazione, da Robot a Revit, è stato effettuato correttamente sia per i plinti isolati che per quelli continui (Figura 2.33).





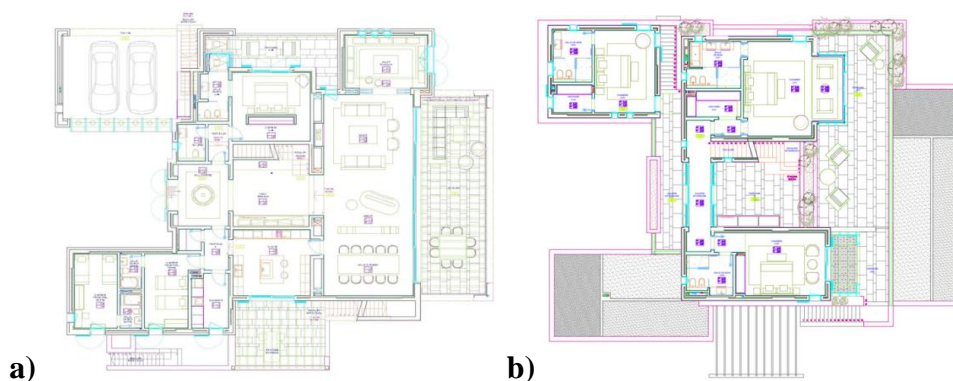
Da questo studio, i ricercatori, identificano alcuni limiti che necessitano di essere attenzionati, tra cui:

- l'interoperabilità Revit-Robot mostra ancora dei limiti e potrebbe non fornire agli ingegneri la necessaria sicurezza di correttezza del modello;
- la generazione automatica del modello analitico non consente ancora di sviluppare una soluzione che sia sempre corretta;
- si avverte una diminuzione della produttività durante la fase inevitabile di adattamento del modello analitico, prima del trasferimento su Robot.

Nonostante alcuni limiti riscontrati, gli autori mostrano un certo ottimismo nell'adozione del BIM nella progettazione strutturale. I ricercatori, sempre nello stesso lavoro di ricerca, sviluppano il modello per le dimensioni del BIM: 4D (Tempi e controllo interferenze), 5D (Costi) e 6D (Sostenibilità), mostrando e argomentando quelli che sono stati i risultati da loro ottenuti.

**Gartoumi K.I., et al.**, nel **2023**, sviluppano una ricerca con l'obiettivo di analizzare l'interoperabilità BIM architettonico-strutturale, con i software Revit e Robot.

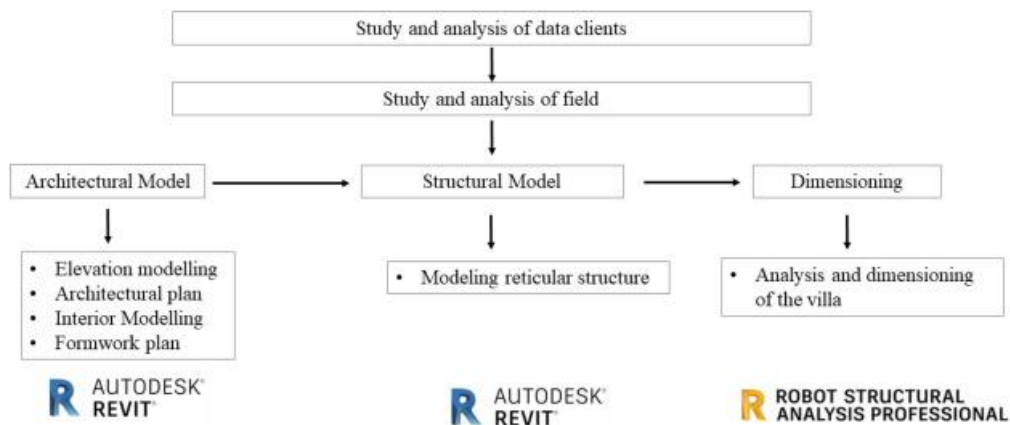
Il caso studio riguarda un progetto per la realizzazione di una villa di 670 mq su due elevazioni. Il modello BIM architettonico della struttura è stato creato con Revit, utilizzando come base le piante architettoniche in formato CAD (Figura 2.36).



**Figura 2.36 – Pianta del piano terra (a) e del secondo piano (b), del modello proposto per l'analisi (Gartoumi et al., 2023).**

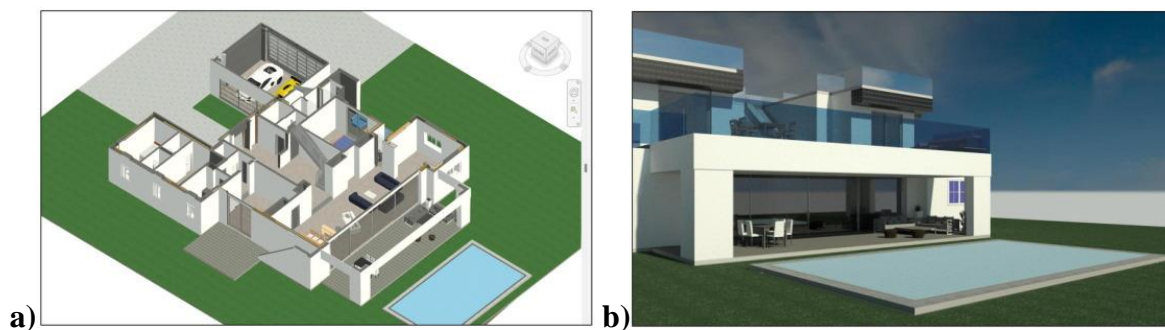
Per l'analisi del caso studio proposto, gli stessi autori presentano il workflow utilizzato nella sperimentazione (Figura 2.37). Il modello strutturale è stato generato con Revit e successivamente le informazioni sono state trasmesse al software Robot Structural Analysis, tramite collegamento diretto da file nativo, per effettuare il calcolo e

dimensionamento delle armature.

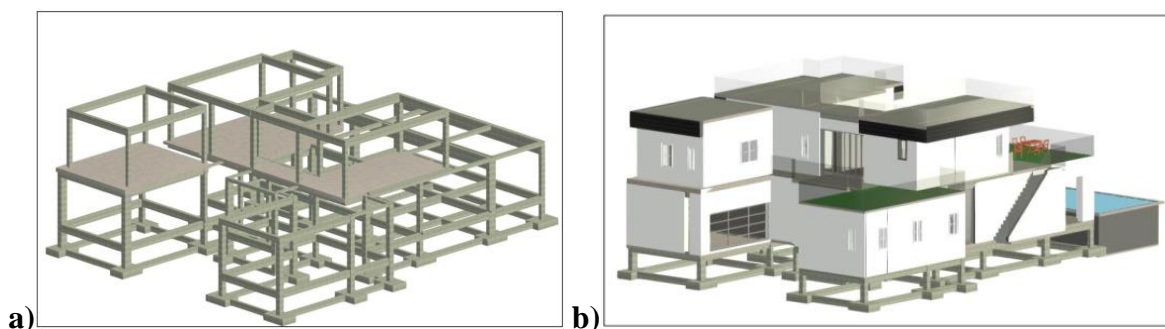


**Figura 2.37 – Workflow di lavoro proposto per il caso studio (Gartoumi et al., 2023).**

Nelle fasi di creazione del modello architettonico (Figura 2.38) e strutturale, i ricercatori hanno impostato tutte le caratteristiche fisiche e meccaniche dei materiali componenti la struttura. Il modello strutturale (Figura 2.39) è stato creato sulla base del modello architettonico, effettuando un predimensionamento delle strutture per ragioni architettoniche.



**Figura 2.38 – (a) Spaccato modello architettonico 3D; (b) Vista esterna modello architettonico; (Gartoumi et al., 2023).**



**Figura 2.39 – (a) Vista 3D modello strutturale; (b) Vista 3D modello federato; (Gartoumi et al., 2023).**

Nella parte successiva dello studio i ricercatori mostrano l'interfaccia Revit con i comandi per l'esportazione su Robot (Figura 2.40). Nonostante ciò, vengono solamente riportate alcune indicazioni su come è stata imposta l'analisi strutturale del modello importato in

Robot, senza mostrare ulteriori risultati o considerazioni sull'interoperabilità tra i due software.

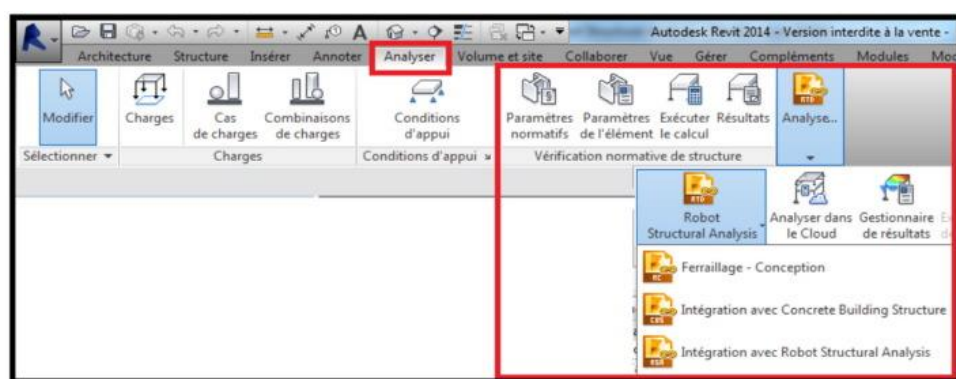


Figura 2.40 – Interfaccia Revit con i comandi per l'esportazione su Robot (Gartoumi et al., 2023).

L'approfondimento sull'interoperabilità architettonico-strutturale nel BIM, che è stato proposto e riportato in questo capitolo ha consentito di caratterizzare alcune problematiche che riguardano il trasferimento delle informazioni dal modello architettonico a quello strutturale, ai fini delle successive analisi. È stato possibile osservare l'applicazione di diverse metodologie di trasferimento, nonché l'uso di diversi software sia di BIM Authoring sia di analisi strutturale.

Alcuni studi sono stati più metodologici di altri, non limitandosi solamente all'analisi dei risultati ottenuti dal trasferimento, ma spingendosi alla ricerca delle cause che hanno condotto alle problematiche riscontrate.

È stato possibile osservare un miglioramento nello scambio diretto da file nativo, come nel caso in cui è stata analizzata la trasmissione delle informazioni da Revit a Robot, ma si riscontrano ancora dei limiti che potrebbero non fornire agli ingegneri la necessaria sicurezza di correttezza del modello acquisito. L'interoperabilità Revit-Robot mostra già grandi potenzialità, ma la generazione automatica del modello analitico non consente ancora di sviluppare una soluzione che sia sempre corretta e che quindi necessita ancora spesso di controlli manuali.

Tra i problemi che ad oggi non consentono un fluido trasferimento dei dati nel formato aperto IFC, il disordine dell'implementazione degli standard MVD nei diversi software è quello che dovrebbe essere attenzionato maggiormente.

Per quanto riguarda l'ambito strutturale, i software di settore utilizzano dei requisiti di scambio (MVD) diversi da quelli a loro necessari. La maggior parte dei software fa riferimento alla MVD *Coordination View 2.0* invece che alla più corretta *Structural Analysis View*.

I software strutturali, che implementano il formato aperto IFC, si ritrovano a gestire così un set di informazioni che non è a loro dedicata né specifica, con tutte le conseguenze negative che a ciò possono essere connesse.

Dagli studi analizzati si è potuto osservare come l'MVD *Coordination View 2.0* per IFC2x3 non mostri la capacità di soddisfare appieno i requisiti di trasferimento dal dominio architettonico a quello strutturale. I risultati che si ottengono variano di molto tra i software e risultano sempre non soddisfacenti anche solamente per quanto riguarda gli elementi geometrici del modello.

Ulteriori informazioni, come ad esempio il modello analitico della struttura, i vincoli esterni e interni, i carichi e le relative combinazioni, i materiali, le sezioni e i risultati di analisi non risultano recepibili dalla gran parte dei software, anche nei casi in cui queste informazioni erano presenti nel file. Questo risultato comporta che ad ogni avanzamento del progetto risulta necessario, di volta in volta, reinserire le informazioni perdute, senza possibilità di mantenimento e di confronto con le precedenti versioni progettuali.

La creazione di molteplici e diversificate MVD ha portato le software house a selezionarne solo alcune, e in aggiunta a scegliere se implementarle per l'importazione o l'esportazione dei file. Questo particolare aspetto ha spinto lo sviluppo di trasferimenti diretti con file nativo.

Questi presupposti hanno sicuramente contribuito alla creazione dello scenario attuale, in cui si ha una moltitudine di software che implementano diverse MVD e che quindi non risultano totalmente interoperabili l'uno con l'altro.

Pertanto, un miglioramento nello scambio delle informazioni nel formato aperto IFC non può essere solamente sviluppato da una singola software house, ma prevede un processo di riorganizzazione degli standard attuali con azioni che possano coordinare l'applicazione degli standard di interscambio delle informazioni.



### 3. CASO STUDIO: INTEROPERABILITÀ E WORKFLOW BIM PER LA PROGETTAZIONE INTEGRATA ARCHITETTONICA E STRUTTURALE

In questo capitolo viene analizzata l'interoperabilità, con metodi e strumenti specifici del BIM, con particolare riferimento al processo di progettazione che interconnette la disciplina architettonica a quella strutturale, al fine dell'ottenimento di un modello BIM federato.

Il modello di analisi scelto è quello di un fabbricato residenziale. L'edificio in oggetto, ubicato nel comune di Palermo (PA) alla latitudine  $38.11564^\circ$  e alla longitudine  $13.361297^\circ$ , si trova a 14m sul livello del mare e dista dalla costa 1.2km. Si sviluppa per cinque elevazioni fuori terra. In pianta ha dimensioni di  $27.90\text{m} \times 11.00\text{m}$  e la struttura è realizzata in cemento armato gettato in opera. Si è previsto di destinare il piano terra a delle attività commerciali e di destinare le altre elevazioni in appartamenti configurati da due unità abitative standard per piano. Il fabbricato è provvisto di un tetto piano praticabile a cui si accede dal torrino del vano scale e dagli ascensori, ed è posizionato nella parte centrale della struttura (Figura 3.1). L'altezza di interpiano è di 2,70m, ad eccezione del piano terra che avrà un'altezza pari a 3,60m.

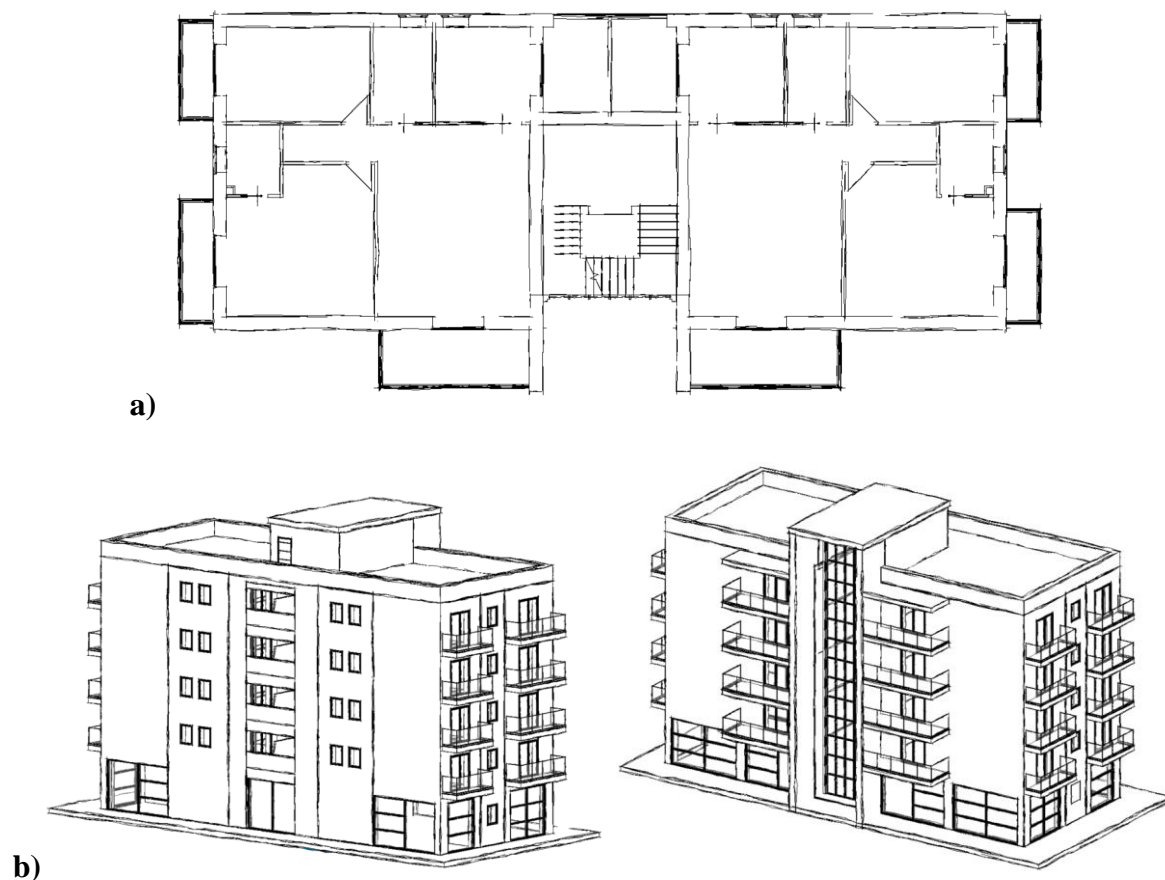
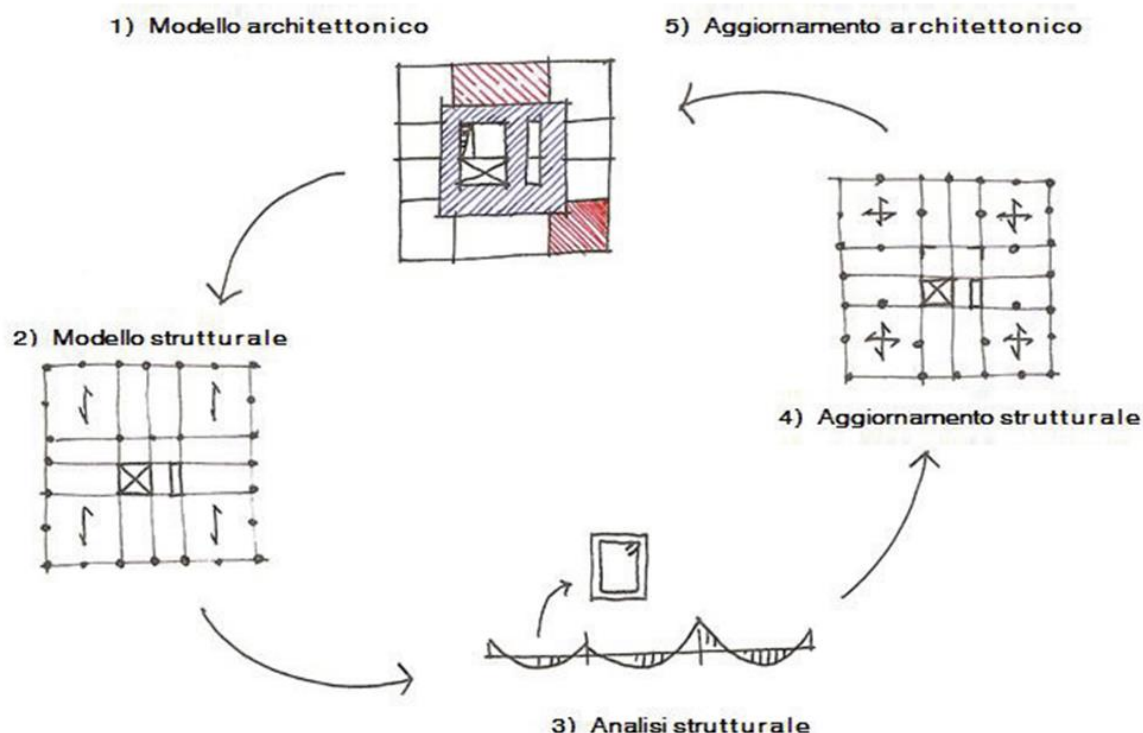


Figura 3.1 – Concept architettonico: pianta piano tipo (a) e assonometrie (b).

In un lavoro di ricerca, Donato V., nel 2011, ha riportato il workflow che si riscontra nelle fasi combinate di progettazione architettonica e strutturale (Figura 3.2), schematizzando lo stesso come se fosse un processo ciclico (Figura 3.2).

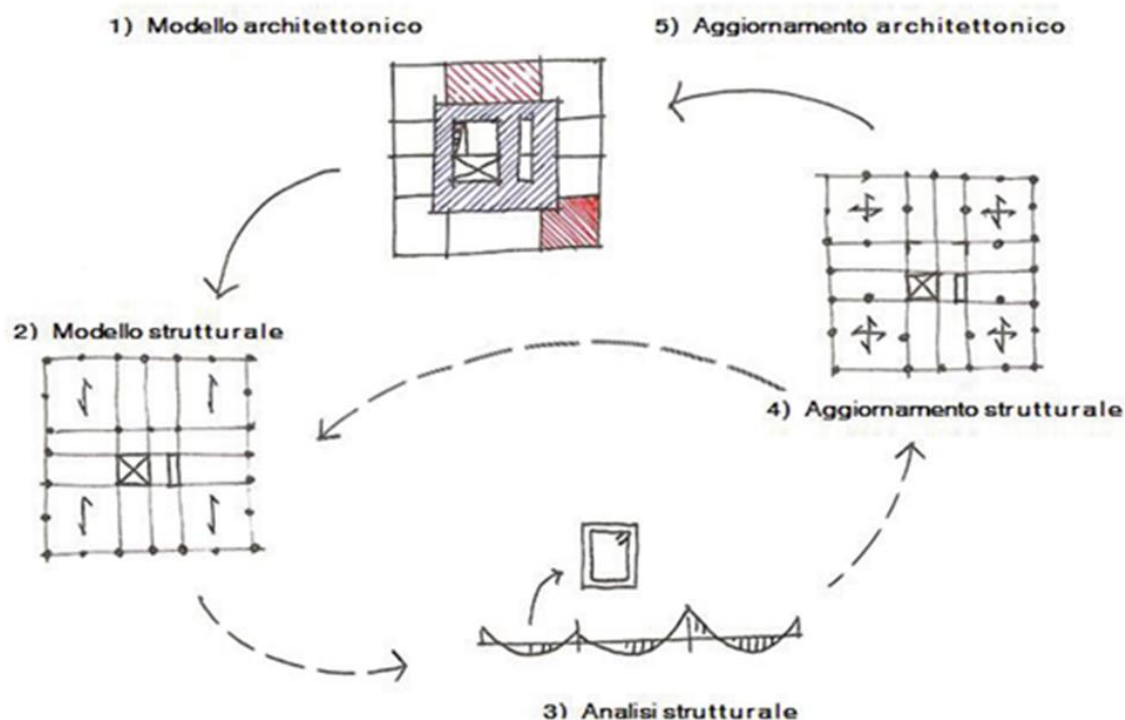


**Figura 3.2 – Workflow del processo di progettazione architettonico-strutturale (Fonte: Donato V., (2011), Building Information Modeling (BIM): analisi applicata al centro affari di Arezzo).**

Lo stesso workflow è stato adottato nel presente lavoro di tesi, inserendo all'interno dello stesso un sotto-flusso, riguardante esclusivamente le fasi di progettazione e di analisi strutturale (fasi 2, 3 e 4, di figura 3.2).

Tale necessità di modifica nasce dalle circostanze che sono state riscontrate durante la progettazione del caso studio. Nello specifico ci si è accorti che in realtà il passaggio dal modello strutturale aggiornato al modello architettonico (passaggio dalla fase 4 alla 5, di figura 3.2) avviene solamente dopo un loop di progettazione esclusivamente di tipo strutturale, e termina quando il modello strutturale ha soddisfatto tutte le verifiche previste dalla normativa.

L'arresto del workflow principale, invece, si ha solamente al momento in cui si ottiene una soluzione la quale, partendo dalla soluzione strutturale aggiornata, soddisfa anche i requisiti architettonici (Figura 3.3).



**Figura 3.3 - Workflow del processo di progettazione architettonico-strutturale modificato. Le linee tratteggiate vanno a definire il sotto flusso della sola progettazione strutturale.**

Partendo dalla pianta architettonica del piano tipo, realizzata nel modello architettonico (fase 1), è stato possibile definire il modello strutturale dell'edificio, dimensionato inizialmente effettuando valutazioni strutturali di massima e rispettando i vincoli di natura architettonica (fase 2). Per la verifica del modello strutturale è stata successivamente effettuata un'analisi dinamica lineare con spettro di risposta (fase 3). L'edificio è stato modellato con incastri alla base con un'altezza di calcolo di 18.50m. Il sub-processo di modellazione e analisi della struttura è terminato quando sono state verificate tutte le prescrizioni normative previste per la progettazione strutturale in zona sismica, potendo determinare così anche l'armatura della struttura (fase ciclica 2-3-4).

Verificata la soluzione strutturale le informazioni della stessa sono state trasferite per l'aggiornamento del modello architettonico, effettuando in seguito le successive valutazioni di ammissibilità architettonica del modello (fase 5).

Date le problematiche relative all'interoperabilità tra i domini architettonico-strutturale illustrate al capitolo 2, viene proposta una strategia alternativa di progettazione che, pur non rientrando pienamente in un'ottica di progettazione BIM, ha consentito di ottenere il modello BIM federato della struttura analizzata.

Per quanto riguarda la progettazione del modello architettonico è stato utilizzato il software di BIM Authoring Revit, versione 2021. Il modello strutturale è stato sviluppato e analizzato con il software Jasp 7.5<sup>38</sup>. La scelta di quest'ultimo software è dettata dalla conoscenza sia delle potenzialità che delle criticità. Alcune considerazioni sono state effettuate riguardo il possibile utilizzo del software Robot Structural Analysis, in quanto, appartenendo alla software house di Revit, consente il trasferimento delle informazioni di tipo diretto da file nativo.

Una ulteriore modellazione proposta è quella relativa ad una parte dell'impianto idrico dello stesso edificio (MEP model), effettuata con il software Revit 2021. Tale modellazione è stata sviluppata al solo fine di offrire una visione d'insieme più completa delle peculiarità del BIM, applicato alla progettazione integrata di un'opera edilizia, ma non ha previsto una fase vera e propria di progettazione dell'impianto.

Terminata la creazione dei modelli architettonico, strutturale e MEP dell'edificio, gli stessi modelli sono stati sottoposti a verifica delle interferenze geometriche e spaziali (*clash detection*), conducendo a riflessioni sulle possibili azioni correttive per ogni singolo modello. Successivamente si è passati all'aggregazione dei singoli modelli in un unico modello federato (*federated model* o *merged model*) effettuando un'ulteriore analisi delle interferenze. Il workflow per il controllo delle interferenze ipotizzato per questo lavoro è stato schematizzato in figura 3.4. Per i controlli delle interferenze del modello federato, ma anche per i modelli non nativi di Revit, è stato utilizzato il software NavisWorks Manage<sup>39</sup>. Per i singoli modelli nativi di Revit un'ulteriore possibilità è stata quella di poter utilizzare lo stesso software di modellazione per poter effettuare anche il controllo delle interferenze.

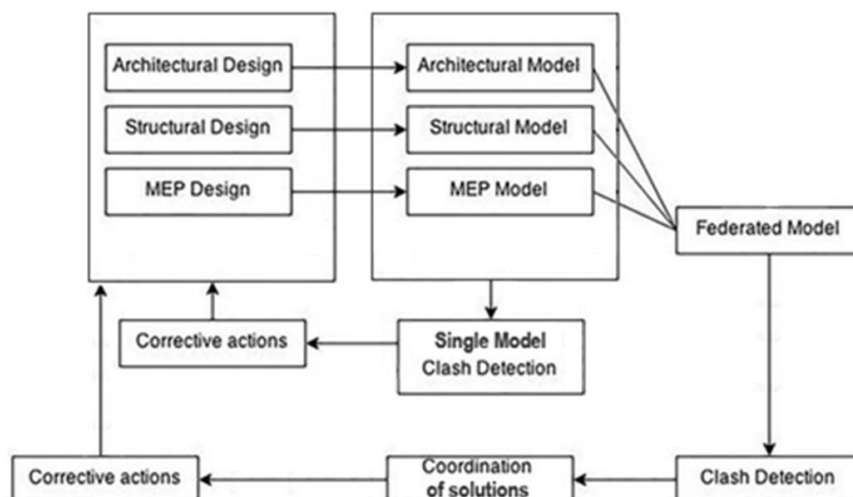
L'ultima parte proposta in questo lavoro è stata quella di mostrare le potenzialità dei modelli BIM per la realizzazione di render fotorealistici e per l'implementazione della realtà virtuale, sfruttando l'interoperabilità dello stesso software Revit con il software di

---

<sup>38</sup> Jasp è un software di calcolo strutturale sviluppato da IngegneriaNet. È un software ad elementi finiti per la progettazione strutturale che effettua il progetto e la verifica agli stati limite ultimi e di esercizio di strutture in cemento armato, acciaio e legno secondo le NTC-2018 e relativa Circolare Applicativa. (<https://www.ingegnerianet.it/software-calcolo-strutturale.php>).

<sup>39</sup> NavisWorks Manage è un software per verifica dei modelli 3D, coordinamento e rilevamento delle interferenze, sviluppato da Autodesk. Il software consente anche di eseguire un controllo delle pianificazioni e dei costi con delle simulazioni 4D e 5D.

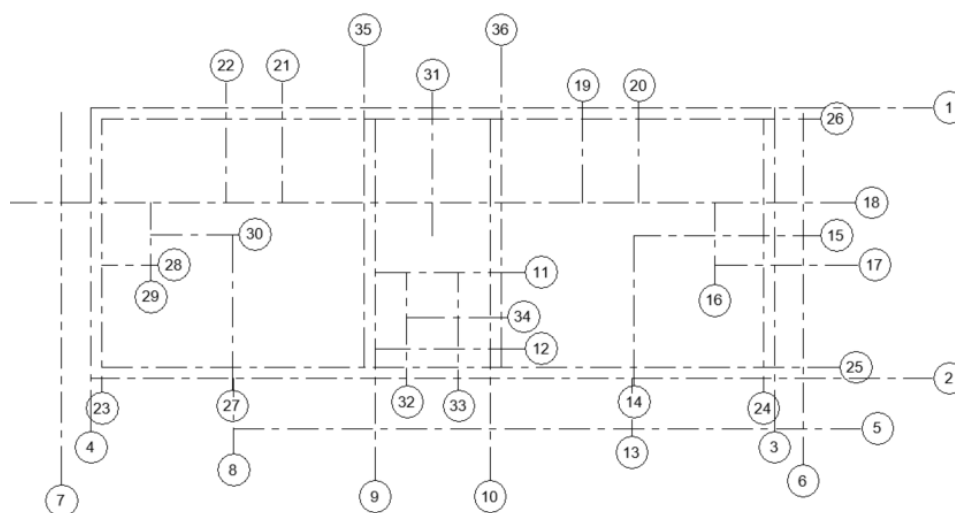
visualizzazione immersiva Enscape<sup>40</sup>.



**Figura 3.4 - Workflow del processo di *clash detection* utilizzato per la validazione dei singoli modelli e del modello federato.**

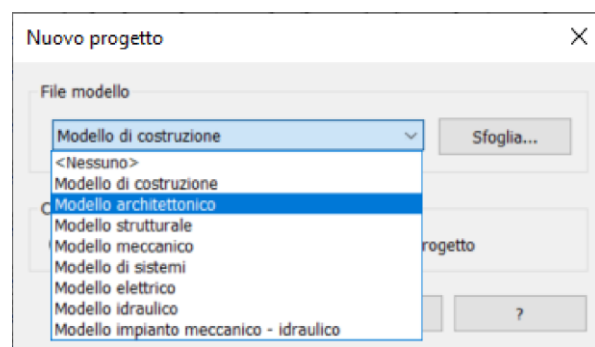
### 3.1 Dal modello architettonico al modello strutturale

Partendo dalle dimensioni in pianta dell’edificio e dalla distribuzione dei locali, ipotizzata nel concept architettonico, il primo passo è stato quello del tracciamento delle griglie di riferimento per la costruzione architettonica della pianta tipo (Figura 3.4). Per la realizzazione del modello architettonico è stato creato un file di “modello architettonico” su Revit versione 2021 (Figura 3.5).



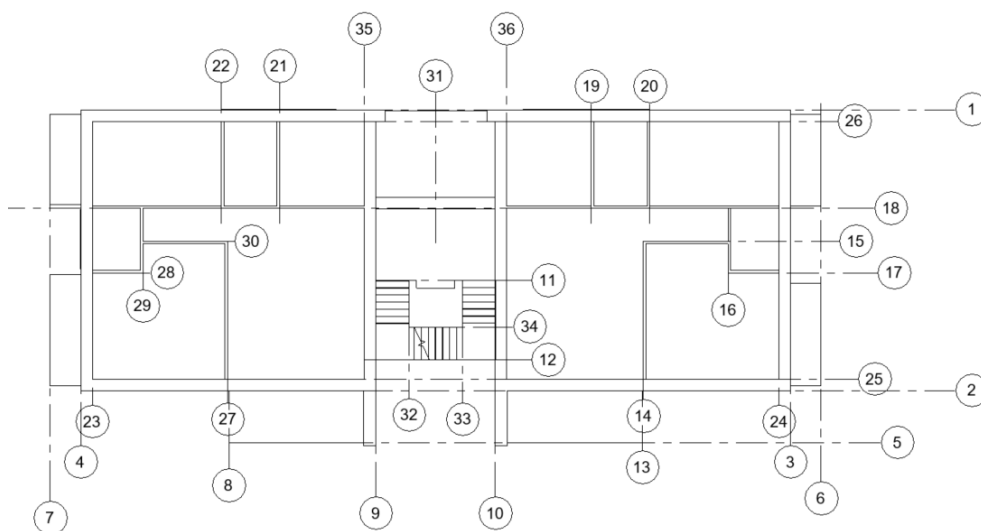
**Figura 3.5 – Tracciamento delle griglie per la costruzione del modello architettonico in Revit 2021.**

<sup>40</sup> Enscape è un software plug-in per rendering sviluppato da Chaos group. Questo software consente lo scambio geometrico bidirezionale tra i programmi CAD o BIM, offrendo inoltre la possibilità di sviluppare render in tempo reale e l’implementazione di realtà virtuale con l’ausilio di visori VR.



**Figura 3.6 – Nuovo progetto, selezione della disciplina per la costruzione del modello Revit 2021.**

Posizionandosi ad un livello generico, a partire dalle griglie si è tracciata la pianta del piano tipo, in quanto è quella che risulta la più architettonicamente vincolante per la definizione dello schema strutturale della struttura. La pianta è stata tracciata inizialmente con famiglie muri generici di 40 e 10 cm ed è stata inclusa l’ubicazione del vano ascensore e della scala, al fine di avere tutti i riferimenti per la definizione della parte strutturale (Figura 3.6).



**Figura 3.7 – Costruzione della pianta architettonica del piano tipo su Revit 2021.**

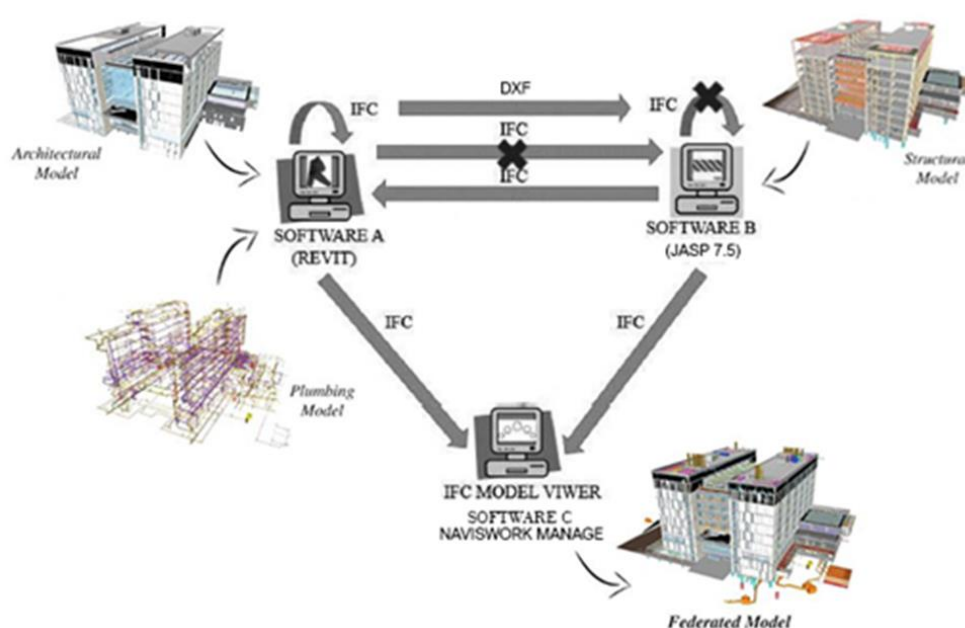
Terminata la realizzazione della pianta del piano tipo, si è passati alla costruzione del modello strutturale, per la successiva analisi e calcolo della armature.

Per la modellazione e per l’analisi strutturale si è scelto di utilizzare il software agli elementi finiti Jasp, versione 7.5, che è in grado di generare in output file IFC della struttura e delle armature. Jasp è un software commerciale per la progettazione strutturale che effettua il progetto e la verifica agli stati limite ultimi e di esercizio di strutture in cemento armato, acciaio e legno secondo le NTC-2018 e relativa Circolare Applicativa.

Ad oggi, questo software presenta ancora delle limitazioni nell'importazione dei file, in quanto non è possibile importare file di tipo IFC, ma è consentita solamente l'importazione di file di interscambio di tipo DXF. Questa caratteristica si è presentata come una forte limitazione dell'applicazione di interoperabilità tipica del BIM, in quanto si sono perse tutte le informazioni relative alla struttura, a parte quella dei fili fissi ottenibili dal file DXF esportato da Revit.

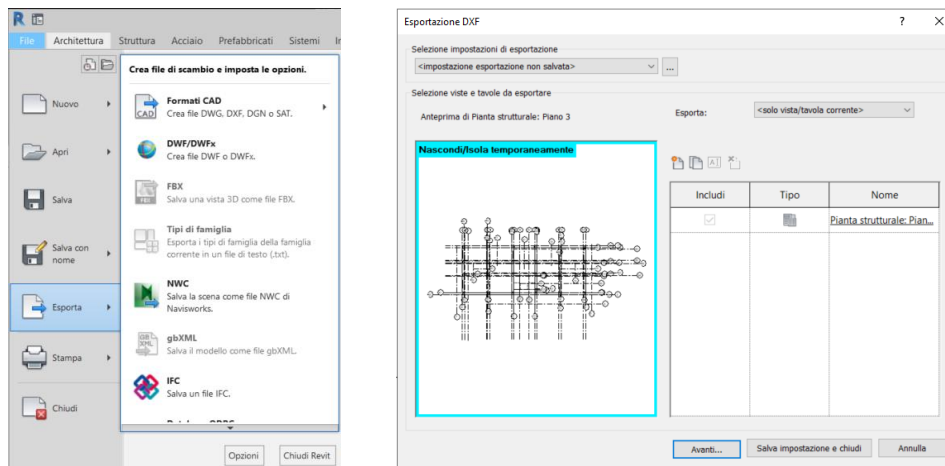
In Figura 3.8, viene mostrato il workflow concettuale del possibile trasferimento dei dati tra i software utilizzati in questa prima analisi, riprendendo il workflow proposto da Muller, et al., nel 2017.

Considerando le indicazioni della norma PAS 1192, il workflow proposto (Figura 3.8) potrebbe essere già classificato come appartenente ad un livello 2 di maturità del BIM (3D BIM), corrispondente ad un livello L3 (avanzato) della UNI 11337 (vedi paragrafo 1.3). I file di output sono tutti di tipo IFC e sarà quindi anche possibile produrre il modello 3D federato. L'unica eccezione nel flusso informativo del workflow ipotizzato è data dal trasferimento con file DXF per l'input di Jasp, tipico di un livello 1 di maturità secondo le PAS 1192. Questa limitazione, comunque, ad oggi può essere ritenuta accettabile poiché, anche nei software di analisi strutturale che hanno la possibilità di importare informazioni nel formato IFC, si sono ottenuti risultati insufficienti nell'interscambio delle informazioni architettonico-strutturali, con la conseguente necessità di dover ricreare ex novo il modello strutturale per le analisi.

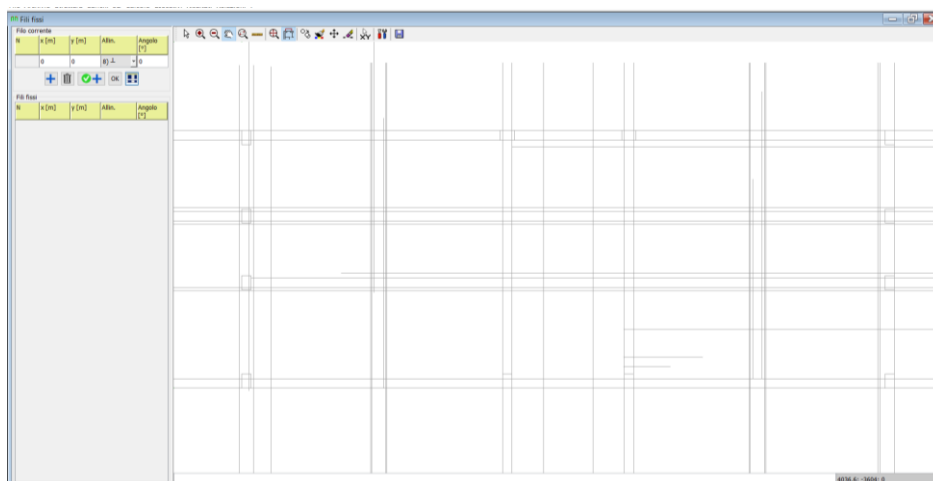


**Figura 3.8 – Workflow trasmissione dati e software utilizzati (workflow modificato - fonte di partenza Muller, et al., 2017).**

Il passaggio successivo, che porta alla creazione del modello strutturale, è stato quello dell'esportazione da Revit del file DXF (*file>esporta>formati CAD<dxf*) (Figura 3.9), seguito dall'importazione dello stesso file su Jasp (Figura 3.10).



**Figura 3.9 – Menu esportazione file \*.dxf, da Revit.**



**Figura 3.10 – Importazione file \*.dxf su Jasp.**

A partire dai riferimenti del file DXF, sono stati creati tutti i fili fissi per la realizzazione del modello di calcolo su Jasp (Figura 3.11). Successivamente sono stati creati i piani, (Figura 3.12) e sono stati, inoltre, creati i materiali, le tipologie di sezione per travi, pilastri e pareti e le diverse tipologie di solai previste (Gruppo tabelle 1).



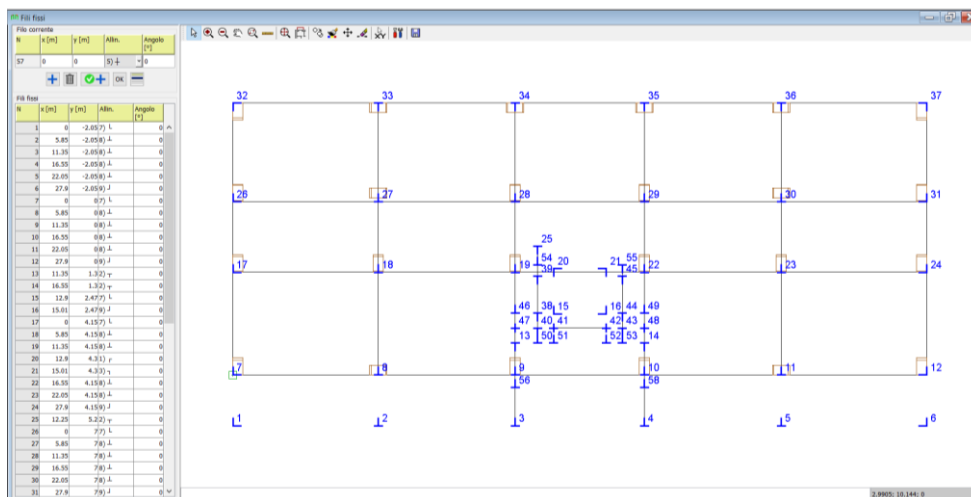


Figura 3.11 – Inserimento fili fissi su Jasp.



Figura 3.12 – Inserimento piani su Jasp.

#### Calcestruzzo

N	Descrizione	fck [MPa]	Rck [MPa]	FC	fcm [MPa]	γc	αcc	εcu [%]	Rig.Tors. [%]
1	C25/30	25	30		33	1.5	0.85	0.35	5

#### Acciaio

N	Descrizione	fyk<40mm [MPa]	FC	fym [MPa]	ftk<40mm [MPa]	fyk40mm [MPa]	ftk40mm [MPa]	A [%]	γS	γM0	γM1	γM2	E [GPa]	Laminazione
2	B450C	450		450	540	450	540	7.5	1.15	1.05	1.05	1.25	200	a Caldo

#### Materiale generico

N	Descrizione	Tipo	E [N/mm²]	C.Pois	G [N/mm²]	Densità [kg/m³]	C. Dil. Term. [10⁻⁶/°C]	Rigid. Tors [%]	FC	Prezzo [€/m³]	Colore
1	C25/30	Cls	31476	0.2	13115	2500	12	5		100.00	
2	B450C	Fe	200000	0.3	76923	7850	12	100		9420.00	

#### Sezioni Beam Calcestruzzo

N	Descrizione	Sezione	Materiale	Parametri FEM Beam	Criteri CA	Parametri Travi CA	Parametri Pilastri CA	W	Posa Fondazione	L.impr. [m]	k.Wink. [N/cm²]	Colore
1	R 40x50	10) R 40x50	1) C25/30	1) Fem Beam	4) TRAVI	1) par.Trav	1) par.Pil	No		0	0	[0;204;153]
3	R 40x70	16) R 40x70	1) C25/30	1) Fem Beam	1) PILASTRI 1	1) par.Trav	1) par.Pil	No		0	0	[51;255;51]
4	R 130x15	2) R 130x15	1) C25/30	1) Fem Beam	3) SCALE E SECONDARI	1) par.Trav	1) par.Pil	No		0	0	[255;204;0]
5	R 40x60	9) R 40x60	1) C25/30	1) Fem Beam	10) PILASTRI 2	1) par.Trav	1) par.Pil	No		0	0	[0;0;255]
6	R 80x25	8) R 80x25	1) C25/30	1) Fem Beam	4) TRAVI	1) par.Trav	1) par.Pil	No		0	0	[0;153;153]
7	R 40x60	3) R 40x60	1) C25/30	1) Fem Beam	4) TRAVI	1) par.Trav	1) par.Pil	No		0	0	[102;0;102]

## Sezioni Pareti Calcestruzzo

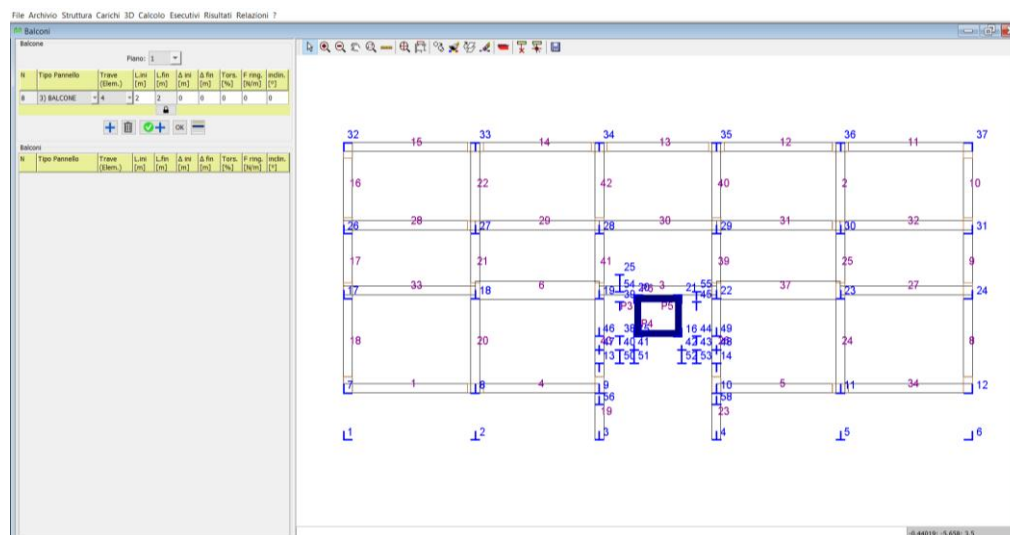
N	Descrizione	Spess. [m]	Materiale	Criteri CA	Tipo	Parametri Pareti CA	k Wink. [N/cm²]	Posa Fondazione	Parametri FEM Shell	Parametri Prog. Shell CA	Int. G2 [N/m²]	Colore
2	S30 ASCENSORE	0.3	1) C25/30	5) PARETI ASCENSORE	WCM	1) PARETI ASCENSORE	0		1) Parametri Shell	1) opz prog PARETI	0	[255;153;0]

## Sezioni Solai

N	Descrizione	B [m]	b [m]	s [m]	H [m]	γ Pignatta [kg/m³]	Prez pign. [€/m³]	Materiale	Criteri CA	Criteri solai	N. Tral.	Tralici	L/δ	Colore
1	SOL 20+5	0.5	0.16	0.05	0.3	800	100	1) C25/30	6) SOLAI	1) Crit.Sol.1	0		250	[0;255;204]
2	SOL 20+5 COPERTURA	0.5	0.12	0.05	0.25	800	100	1) C25/30	6) SOLAI	1) Crit.Sol.1	0		250	[255;0;51]
3	GETTO PIENO	0.5	0.1	0.2	0.2	1	100	1) C25/30	7) BALCONI	1) Crit.Sol.1	0		250	[0;102;255]

**Gruppo tabelle 1 – Materiali, sezioni travi, pilasti e pareti in cls e sezioni solai, inseriti su Jasp.**

Le travi e i pilastri sono stati inseriti per piani e, inoltre, sono state modellate le pareti per la costruzione del vano ascensore (Figura 3.13) su cui è stata ancorata anche una scala a soletta rampante a tre rampe. I solai e i balconi sono stati inseriti nel modello strutturale dal menu carichi (Figura 3.14). L'orditura dei solai ha tenuto conto delle considerazioni poste in atto in fase di predimensionamento della struttura. Dal menu carichi sono state anche inserite tutte le tamponature della struttura. Alla fine della modellazione è stato possibile ottenere il modello tridimensionale della struttura (Figure 3.15–3.17). Tutti i nodi della struttura sono liberi, ad eccezione dei nodi del piano terra, in cui è stato imposto un vincolo del tipo incastro. Per il completamento del modello, nel vano ascensore è stata inserita una piastra di fondazione, per quanto essa non è stata oggetto di calcolo.



**Figura 3.13 – Inserimento pilastri, travi e pareti su Jasp.**

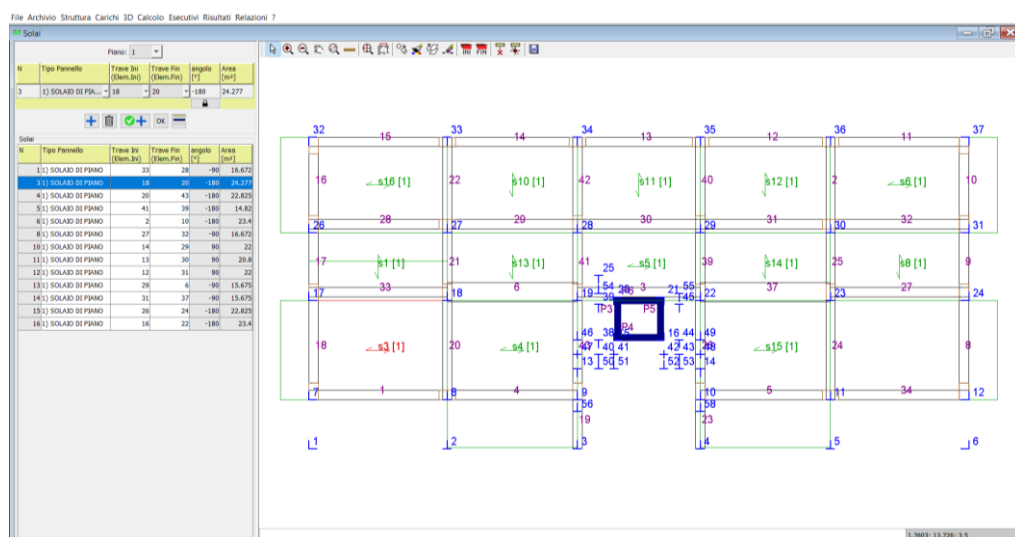


Figura 3.14 – Inserimento solai e balconi su Jasp.

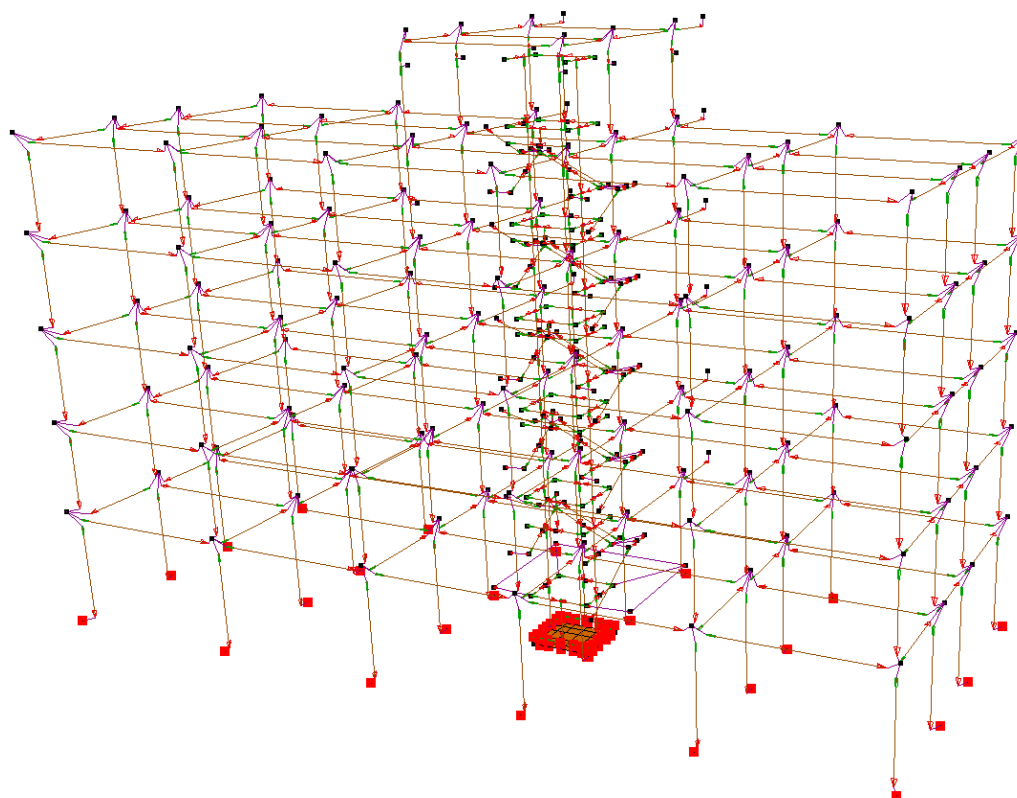
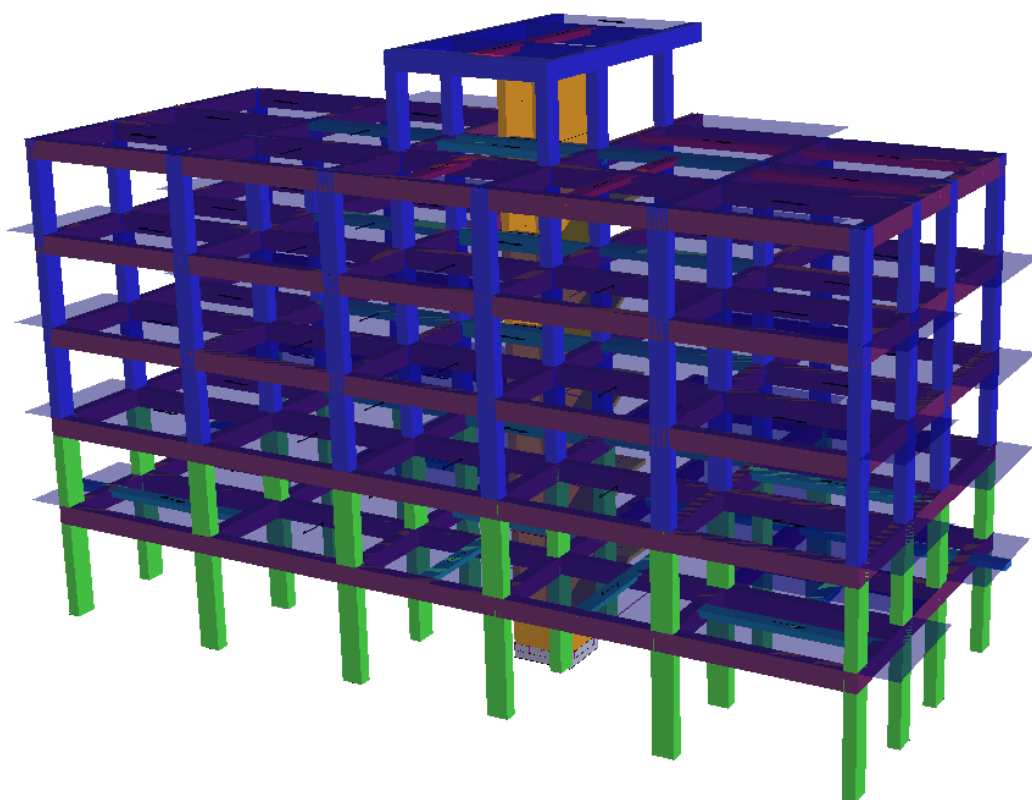
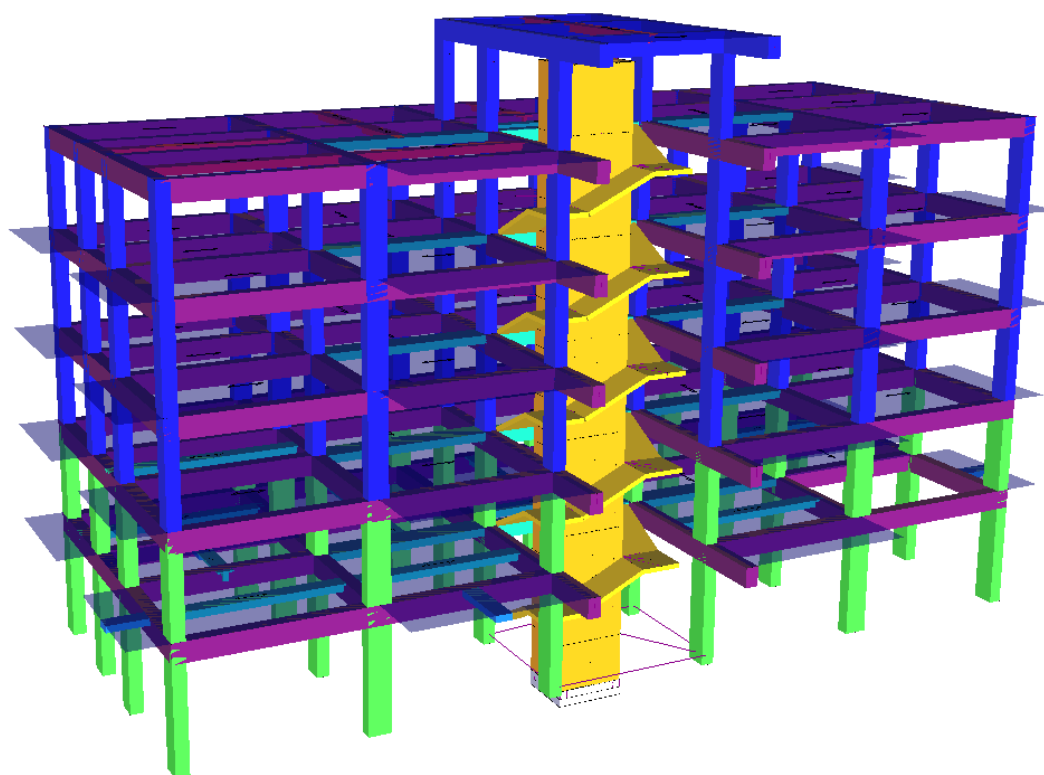


Figura 3.15 – Modello 3D delle interconnessioni tra gli elementi strutturali.



**Figura 3.16 – Modello 3D degli elementi componenti la struttura (vista 1).**



**Figura 3.17 - Modello 3D degli elementi componenti la struttura (vista 2).**

### 3.2 Dal modello strutturale all'analisi strutturale

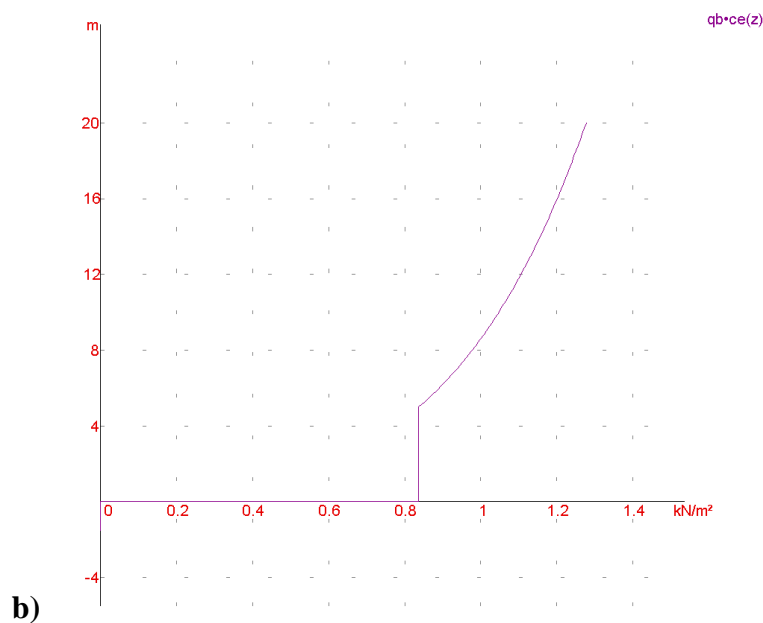
La modellazione della struttura ha riguardato la parte di costruzione del modello geometrico della stessa, nel quale sono stati definiti materiali e relazioni di vincolo degli elementi. Terminata la modellazione, la fase successiva ha riguardato la definizione delle azioni sulla struttura. Impostando sul software l'ubicazione e la destinazione d'uso della struttura vengono impostate automaticamente delle azioni di default, secondo le prescrizioni normative<sup>41</sup>, che comunque è possibile modificare. Di seguito si riportano le interfacce del software con il dettaglio delle azioni settate per l'analisi (Figure 3.18 – 3.21).

Dati generali Struttura		Neve	
Comune	Palermo	Zona neve	III
Provincia	Palermo (PA)	Periodo di ritorno [anni]	50
Latitudine [°]	38.116	Neve al suolo qsk [N/m <sup>2</sup> ]	600
Longitudine [°]	13.361	Topografia	Normale
Altitudine [m]	14	Coefficiente topografia	1
Tipo di opera	2: Ordinaria	Coefficiente termico	1
Vita nominale anni	50		

**Figura 3.18 – Dati generali della struttura e della zona climatica.**

a)

<sup>41</sup> Il software Jasp effettua l'analisi della struttura e le verifiche sugli elementi in accordo alle vigenti disposizioni legislative ed in particolare alle seguenti norme: Legge 05/11/1971, n.1086, "Norme per la disciplina delle opere di conglomerato cementizio armato, normale e precompresso ed a struttura metallica"; Legge 02/02/74, n.64, "Provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le zone sismiche"; Decreto Ministeriale del 17/01/2018, "Norme tecniche per le costruzioni" (di seguito NTC18) e relative "Istruzioni per l'applicazione" ovvero Circolare ministeriale n°7 CSLP del 21/1/2019 (di seguito CNTC18); Decreto ministeriale 65 del 07/03/2017, "Linee guida per la classificazione del rischio sismico delle costruzioni". Inoltre, considera gli Eurocodici 2, 3, 5, 6, 8 e la CNR DT 206-R1/2018.



**Figura 3.19 – a) Interfaccia di Jasp per la definizione dell’azione dovuta al vento, con il dettaglio dei parametri utilizzati per l’analisi; b) Profilo del vento calcolato dal software.**

**Carico Sisma**

Zona Sismica

Provincia:

Comune:

Sismicità: ☒ 2: medio-alta

Codice sismicità: ☐ 2

Latitudine: [°]

Longitudine: [°]

Periodo di riferimento

Vita nominale [anni]:

Classe uso:

Periodo di riferimento TR [anni]: ☐

Liquefazione terreno

Magnitudo di riferimento: ☐

Parametri  $a_g, F_o, T_c^*$

	<input type="checkbox"/>	Pvr[%]	Tr	<input type="checkbox"/>	$a_g/g$	$F_o$	$T_c^* [s]$
SLO	<input type="checkbox"/>	81	30	<input type="checkbox"/>	0.043	2.34	0.23
SLD	<input type="checkbox"/>	63	50	<input type="checkbox"/>	0.061	2.34	0.25
SLV	<input type="checkbox"/>	10	475	<input type="checkbox"/>	0.176	2.38	0.29
SLC	<input type="checkbox"/>	5	975	<input type="checkbox"/>	0.228	2.42	0.304

Risposta locale sisma

Categoria Sottosuolo:

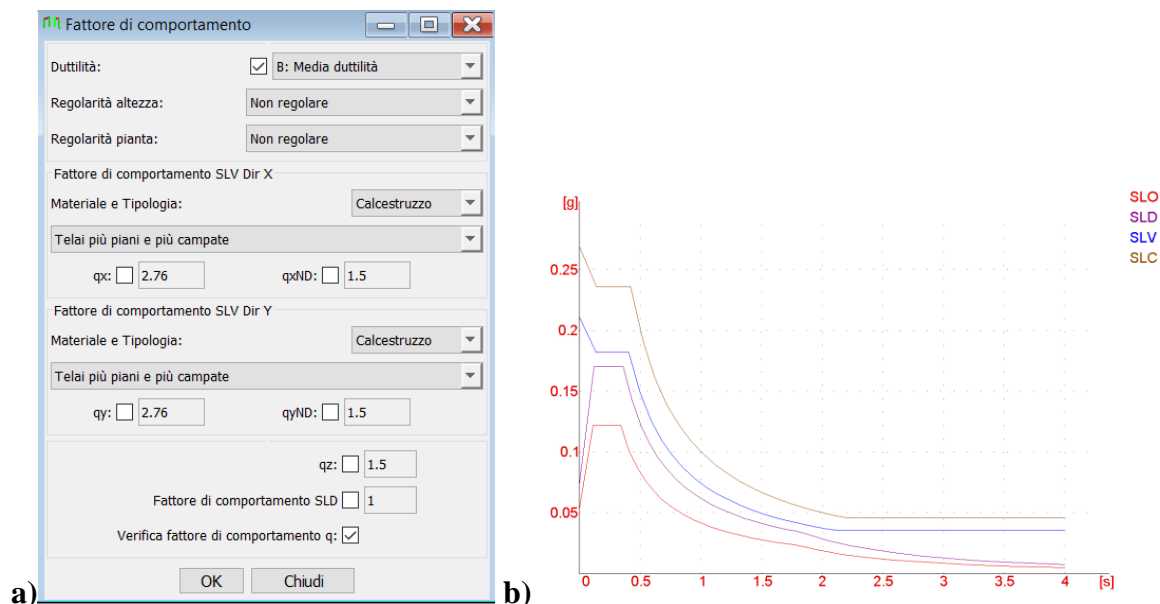
Categoria Topografia:

Posizione Pendio[Rilievo]:

Smorzamento viscoso:  $\xi$ [%] ☐

Quota zero sismico [m]:

**Figura 3.20 – Interfaccia di Jasp per la definizione dell’azione sismica, con il dettaglio dei parametri utilizzati per l’analisi.**



**Figura 3.21 – a) Interfaccia parametri per il calcolo del fattore di comportamento “q”; b) Spettri di progetto calcolati dal software.**

Altri ulteriori parametri di input sono stati quelli relativi ai parametri di verifica degli elementi, in cui è stato possibile selezionare quali verifiche effettuare sulla tipologia di elemento (Figura 3.22), e ai criteri di progetto degli elementi strutturali (Figura 3.23). Nei criteri di progetto, in particolare, riguardano le condizioni ambientali, i diametri di ferri e staffe che si vogliono inserire all'interno delle sezioni, le distanze minime intraferro, il passo minimo delle staffe, lo spessore del copriferro, le lunghezze massime dei ferri e le lunghezze di ancoraggio. I criteri di progetto creati sono stati successivamente assegnati alle rispettive categorie di elementi del modello. Tali input sono molto importanti al fine del dimensionamento dell'armatura, della verifica geometrica degli elementi e della verifica delle sezioni. È possibile ottimizzare l'armatura della struttura creando i parametri più adatti ad ogni tipologia di elemento.

**Parametri Verifica CA**

N	Descrizione	SLU Lin.	Duttilità	SLU ali Wink	SLE Tens	SLE fess.	Ripresa	Min da Criteri	Geom §4.1.6	Geom §7.4.6	Ger. V-M	Ger. Tra-Pil	Geom Nodo	Resist. Nodo	Rotaz.
1	PRINCIPALI	auto	auto	auto	auto	auto	auto	auto	auto	auto	auto	auto	auto	auto	auto

+ - + OK ok & Chiudi

N	Descrizione	SLU Lin.	Duttilità	SLU ali Wink	SLE Tens	SLE fess.	Ripresa	Min da Criteri	Geom §4.1.6	Geom §7.4.6	Ger. V-M	Ger. Tra-Pil	Geom Nodo	Resist. Nodo	Rotaz.
1	PRINCIPALI	auto	auto	auto	auto	auto	auto	auto	auto	auto	auto	auto	auto	auto	auto
2	SECONDARI	auto	No	auto	auto	auto	auto	auto	auto	No	No	No	No	No	auto

**Figura 3.22 – Interfaccia dei parametri di verifica degli elementi strutturali.**

Parametri Generali Criteri Progetto

parametri generali correnti

N	Descrizione	Condiz. ambient.	ricopr. [mm]	Ø st. [mm]	passo St. max.[m]	Ø <sub>1</sub> [mm]	Ø <sub>2</sub> [mm]	k1 intraFe	intraFe min [mm]	intra St. min [mm]	L. max. tonc.[m]	ampl. de Cmb Rara	arrot. passo	min anc./Ø
12		Ordinarie											Si	

Parametri Generali Criteri Progetto

N	Descrizione	Condiz. ambient.	ricopr. [mm]	Ø st. [mm]	passo St. max.[m]	Ø <sub>1</sub> [mm]	Ø <sub>2</sub> [mm]	k1 intraFe	intraFe min [mm]	intra St. min [mm]	L. max. tonc.[m]	ampl. de Cmb Rara	arrot. passo	min anc./Ø
1	PILASTRI 1	Ordinarie	30	12	0.334	26	26	1	26	20	8	1.5 Si		40
2	TRAVI	Ordinarie	30	10	0.334	22	22	1	22	20	8	1.5 Si		40
3	SOLAI	Ordinarie	20	8	0.334	14	12	1	20	20	8	1.5 Si		40
4	SCALE E SECOND...	Ordinarie	20	10	0.334	20	16	1	20	20	8	1.5 Si		40
5	PARETI DUTTILI	Ordinarie	20	8	0.334	28	22	1	28	20	8	1.5 Si		40
6	PARETI ASCENSORI	Ordinarie	20	10	0.334	24	24	1	24	20	8	1.5 Si		40
7	FONDAZIONI	Aggressive	50	10	0.334	24	20	1	24	20	8	1.5 Si		40
8	BALCONI	Ordinarie	30	10	0.334	16	14	1	20	20	8	1.5 Si		40
9	PIASTRE	Aggressive	30	10	0.334	24	20	1	24	20	8	1.5 Si		40
10	PILASTRI 3	Ordinarie	30	10	0.334	26	26	1	26	20	8	1.5 Si		40
11	PILASTRI 2	Ordinarie	30	10	0.334	26	26	1	26	20	8	1.5 Si		40

Figura 3.23 – Interfaccia dei criteri di progetto degli elementi strutturali.

Dopo l'impostazione di tutte le azioni e dei criteri per l'analisi, è stato possibile avviare l'analisi, impostando le ulteriori opzioni per l'analisi sismica e le combinazioni di carico (Figura 3.24). Anche in questo caso, selezionando il tipo di analisi sismica il software imposta le impostazioni di default previste dalla normativa. Al termine delle analisi il software progetterà anche l'armatura sulla base dei criteri precedentemente impostati (Figura 3.25).

Analisi Elastica Lineare

Opzioni analisi sismica

Analisi sismica: Dinamica

Sisma Verticale: ☐

Effetto P-Δ sisma: Automatico

Somma cmb. Sism.: Automatica

Calcolo % rigidità elementi secondari: ☒

Amplificazione sisma: 1

Azioni Termica, Vento, Imprezezioni

Azione Vento: Automatica

Effetto P-Δ vento: ☒

Azione Termica: ☐

Imperfezioni Globali: No

Combinazioni

Rigenera combinazioni: ☒

Esecutivi

Def. Travate: Completa

Def. Travetti Solai: Completa

Progetto armature: Completa

Combinazioni & Verifiche

Automatiche

	SLU	Deform.	Fessur.	Tens. Eserc.	Spost. Sismici	Gerarch. Resist.	Rotaz. Ultima
Fondamentale	<input checked="" type="checkbox"/>						
Rara.				<input checked="" type="checkbox"/>			
Frequente			<input checked="" type="checkbox"/>				
Quasi Perm.		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	
Permanente						<input checked="" type="checkbox"/>	
Sismica SLO					<input type="checkbox"/>		
Sismica SLD	<input type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>		
Sismica SLV	<input checked="" type="checkbox"/>					<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sismica SLC							<input type="checkbox"/>

Calcola Annulla

Figura 3.24 – Interfaccia per la definizione dell'analisi sismica, con il dettaglio dei parametri utilizzati per l'analisi.



L'analisi numerica è condotta col metodo degli spostamenti ipotizzando un comportamento elastico-lineare degli elementi. È quindi utilizzata la tecnica degli elementi finiti connessi solo in corrispondenza di un numero prefissato di punti denominati nodi. I nodi sono definiti dalle tre coordinate cartesiane in un sistema di riferimento globale. Le incognite del problema sono gli spostamenti dei nodi (6 per ogni nodo) riferiti al sistema di riferimento globale, unico per tutti i componenti. Gli spostamenti incogniti sono ottenuti risolvendo un sistema di equazioni algebriche lineari i cui termini noti sono costituiti dalle forze concentrate nei nodi:

$$\mathbf{K} \cdot \mathbf{u} = \mathbf{F}$$

in cui:  $\mathbf{K}$  è la matrice di rigidezza della struttura;  $\mathbf{u}$  è il vettore spostamenti nodali;  $\mathbf{F}$  è il vettore forze nodali.

La risoluzione numerica del sistema viene perseguita tramite il metodo di Cholesky. Ottenuti gli spostamenti vengono calcolate le sollecitazioni nei singoli elementi riferite al sistema di riferimento locale dell'elemento stesso.

L'analisi sismica è di tipo dinamica lineare (§7.3.3.1 NTC18) con masse concentrate sui nodi. Nell'analisi sismica le non linearità geometriche (effetti P-Δ) sono prese in conto attraverso il fattore  $\theta$ , come prescritto dai §§7.3.1 e 7.3.3.3 NTC18.

I modi di vibrare della struttura sono calcolati mediante soluzione dell'equazione matriciale:

$$[\mathbf{K} - \lambda \mathbf{M}] \boldsymbol{\psi} = \mathbf{0}$$

dove:  $\boldsymbol{\psi}$  è l'autovettore;  $\lambda$  è l'autovalore;  $\mathbf{M}$  è la matrice delle masse;  $\mathbf{K}$  è la matrice delle rigidezze. L'equazione è risolta con il metodo di interazione nel sottospazio<sup>42</sup> o col metodo di Lanczos<sup>43</sup>. Per la costruzione della matrice  $\mathbf{M}$  le masse sono considerate concentrate nei nodi e sono trascurate le masse rotazionali.

Gli spostamenti dell'i-esimo modo hanno la forma:

$$\mathbf{u}_i(\mathbf{t}) = \boldsymbol{\psi}_i \mathbf{p}_i \sin(\omega_i \mathbf{t} + \varphi_i)$$

dove:  $\omega^2 = \lambda$ ;  $\varphi$  è la fase;  $\mathbf{p}$  è l'ampiezza (scalare);  $\mathbf{t}$  è il tempo (variabile indipendente).

Nell'analisi si procede con il calcolo delle sollecitazioni modali<sup>44</sup>. Per ogni autovalore  $\lambda_i$  esistono infiniti autovettori  $\boldsymbol{\psi}_i$  proporzionali tra loro. Nel seguito ci si riferisce alla forma  $\boldsymbol{\psi}_i$  ortonormalizzata rispetto  $\mathbf{M}$ , ovvero che verifica la seguente relazione:

$$\boldsymbol{\psi}_i^T \mathbf{M} \boldsymbol{\psi}_i = \mathbf{1}$$

<sup>42</sup> Bathe-Wilson, "Numerical Methods in Finite Element Analysis", 1976, §12.3 – Prentice-Hall.

<sup>43</sup> Thomas J.R. Hughes, "The Finite Element Method", 2000, §10.6 – Dover Publications.

<sup>44</sup> Paolo Rugarli, "Analisi modale ragionata", 2005, §9.1, - EPC Libri.

La matrice diagonale  $\mathbf{M}$  può essere scritta come:

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_x + \mathbf{M}_y + \mathbf{M}_z$$

dove:  $\mathbf{M}_x$ ,  $\mathbf{M}_y$ ,  $\mathbf{M}_z$  sono le matrici delle sole masse traslazionali rispettivamente lungo x, y, e z.

Si definisce il vettore:

$$\mathbf{m}_x = \mathbf{M}_x \boldsymbol{\mu}$$

dove  $\boldsymbol{\mu}$  è vettore con tutti elementi 1 e lunghezza pari alla dimensione della matrice  $\mathbf{M}$ .

Si definisce fattore di partecipazione modale lo scalare:

$$\mathbf{L}_{ix} = \boldsymbol{\psi}_i^T \mathbf{m}_x$$

Si definisce lo scalare:

$$\mathbf{p}_{ix} = \mathbf{S}_x(\mathbf{T}_i, \xi) \mathbf{L}_{ix} / \lambda_i$$

dove:  $\mathbf{T}_i = 2\pi / \omega_i$  è il periodo del modo i-esimo. La funzione  $\mathbf{S}_x(\mathbf{T}, \xi)$  è lo spettro di progetto in accelerazione del sisma x. (§ 3.2.3.2 NTC18).

Il vettore degli spostamenti massimi dovuti all'eccitazione del modo i da parte del sisma x è calcolato con:

$$\mathbf{u}_{ix \max} = \mathbf{p}_{ix} \boldsymbol{\psi}_i.$$

Il software calcola, per il modo i-esimo:

- le sollecitazioni calcolate a partire da spostamenti pari a  $\boldsymbol{\psi}_i$  (espresso in metri)
- la tabella dei coefficienti  $\mathbf{p}_{ix}$  denominati “coefficienti di amplificazione modali”.

La quota di massa partecipante del modo i-esimo al sisma x è lo scalare:

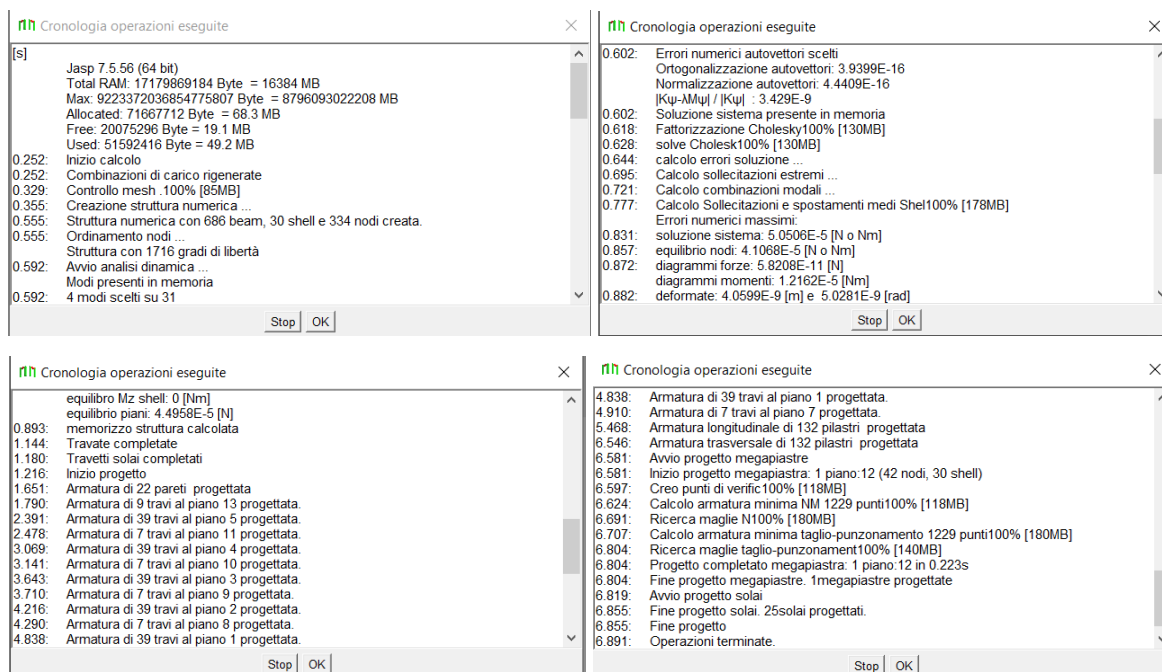
$$\mathbf{s}_{ix} = \mathbf{L}_{ix}^2 / (\boldsymbol{\mu}^T \mathbf{m}_x)$$

dove:  $\boldsymbol{\mu}^T \mathbf{m}_x$  è la somma delle masse sismiche per il sisma x.

Per la combinazione degli effetti riguardanti i singoli modi si utilizza la combinazione quadratica completa come indicato nelle espressioni [7.3.4] e [7.3.5b] delle NTC18.

Gli effetti dell'eccentricità accidentale del centro di massa sono calcolati mediante l'analisi statica come indicato nel §7.3.3 delle NTC18.

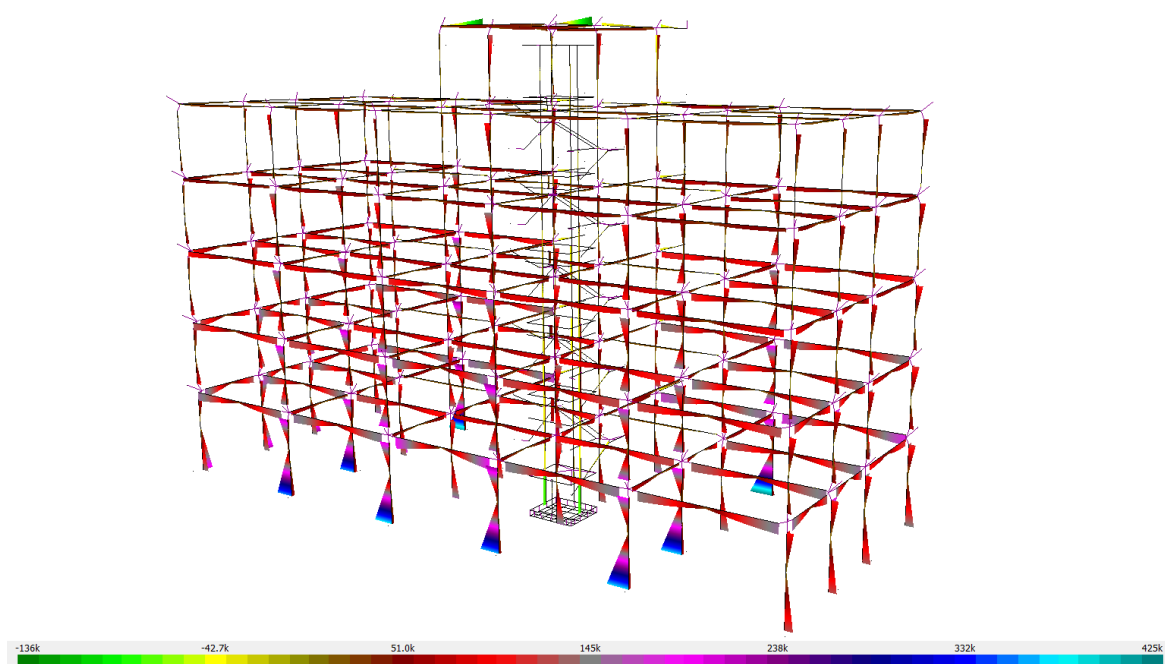
L'individuazione dei nodi nello spazio avviene con il sistema fili-piani. I fili o montanti sono individuati dalle coordinate (x,y) e indicano le rette verticali lungo le quali vengono disposti i pilastri. I piani sono individuati dalla loro quota z e specificano gli orizzontamenti in cui sono disposte le travi.



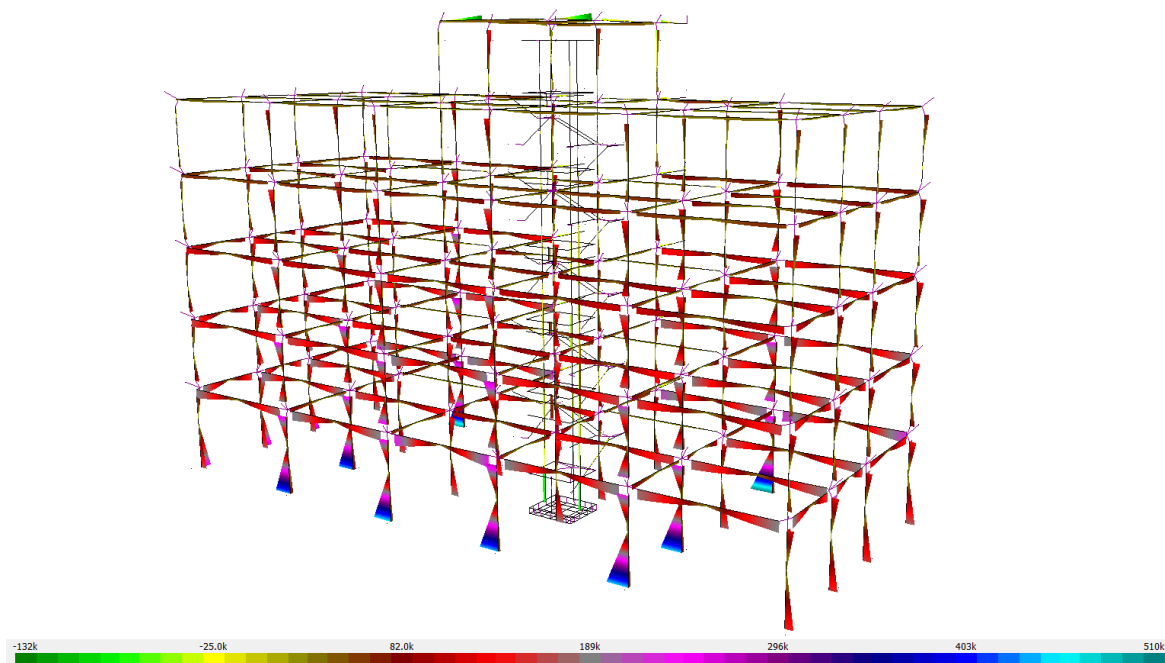
**Figura 3.25 – Cronologia dell’analisi eseguita.**

Le fasi di modellazione e analisi strutturale hanno seguito flusso ciclico, così come ampiamente descritto nella prima parte del capitolo (Figura 3.3). Sia il modello strutturale che i criteri di progettazione delle sezioni in c.a. sono stati aggiornati più volte fino all’ottenimento di una soluzione che rispettasse tutte le prescrizioni normative.

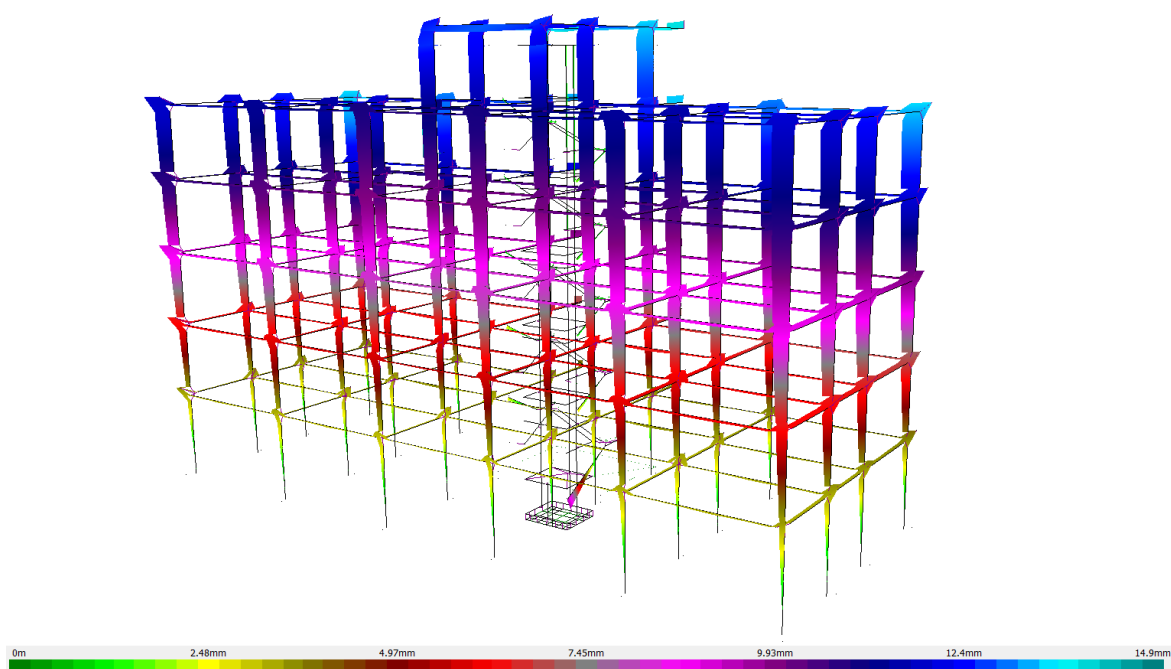
Dei risultati ottenuti con l’analisi riportano di seguito i diagrammi SLD e SLV dei momenti (Figure 3.26 – 3.27), i diagrammi SLD e SLV degli spostamenti (Figure 3.28 -3.29) e alcuni dei diagrammi SLU delle verifiche sia di sollecitazione che geometriche (Figure 3.30 – 3.33).



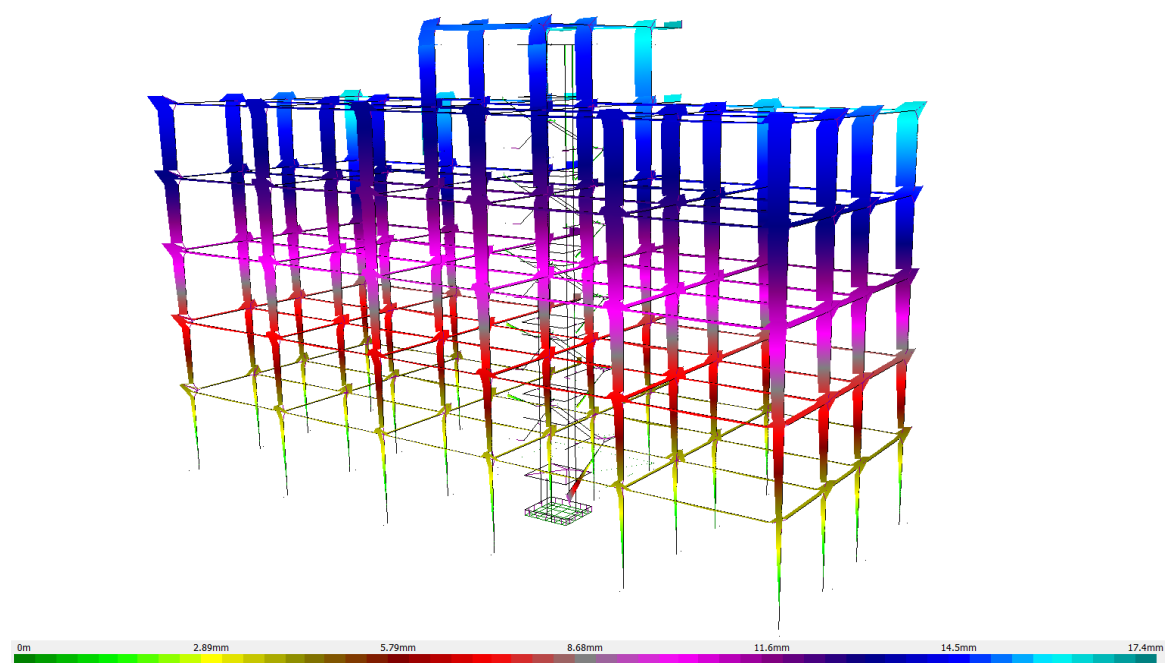
**Figura 3.26 - Diagrammi My-Mz combinazione sismica SLD n.1 (min -136kNm – max 425kNm).**



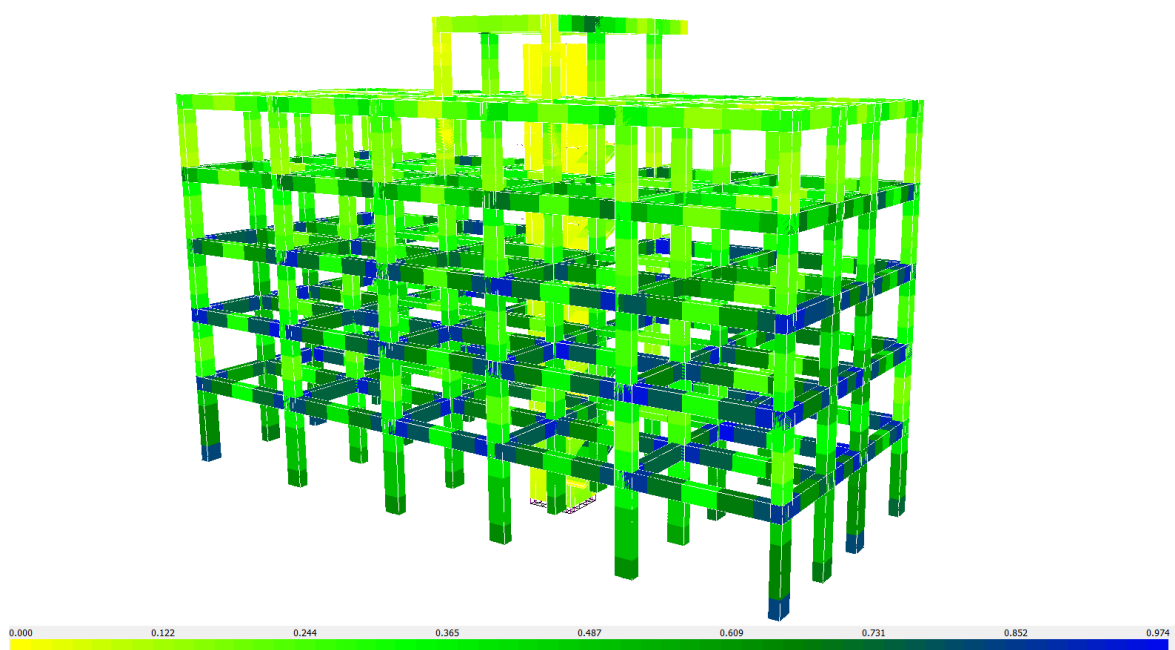
**Figura 3.27 - Diagrammi My-Mz combinazione sismica SLV n.1 (min -132kNm – max 510kNm).**



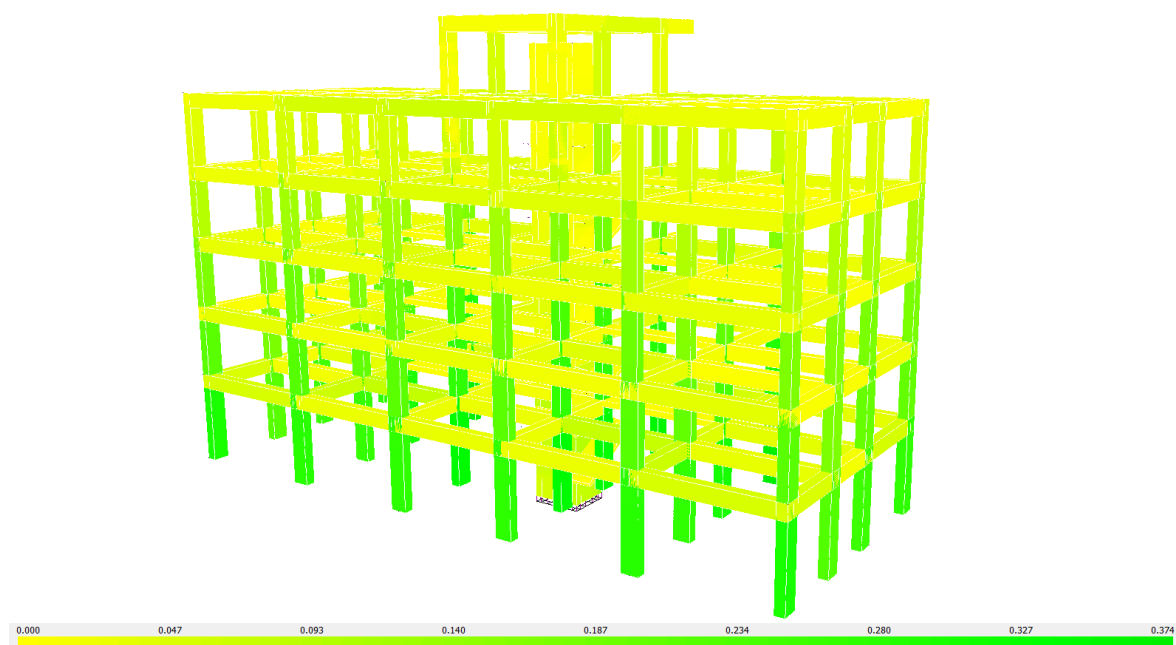
**Figura 3.28 - Diagrammi spostamenti combinazione sismica SLD n.1 (max 14,9 mm).**



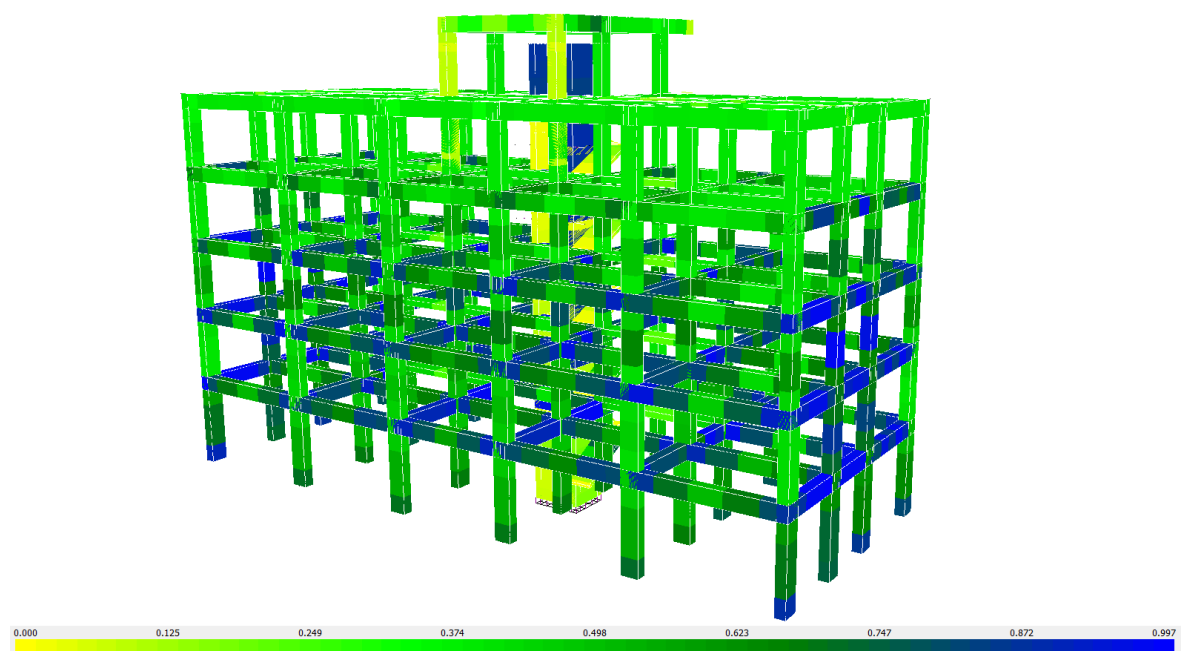
**Figura 3.29 – Diagrammi spostamenti combinazione sismica SLV n.1 (max 17,4 mm).**



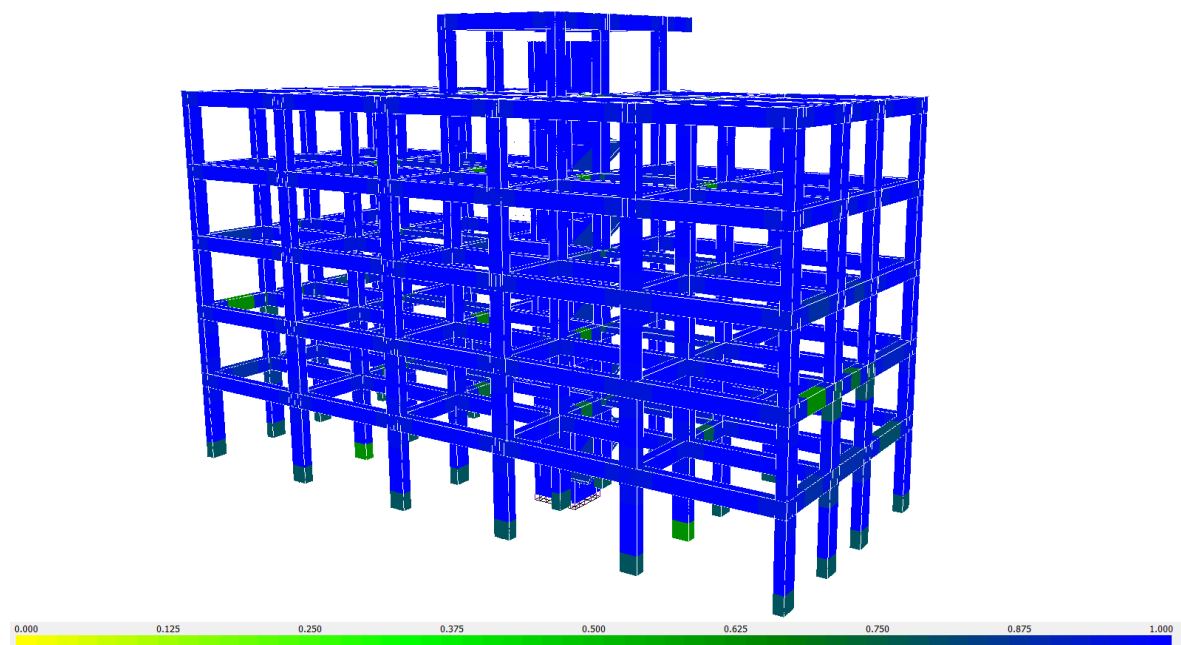
**Figura 3.30 – Diagramma verifche S.L.U.  $M_y/M_{ry}$  (max 0.9874).**



**Figura 3.31 - Diagramma verifche S.L.U.  $N/N_{max}$  (max 0.374).**

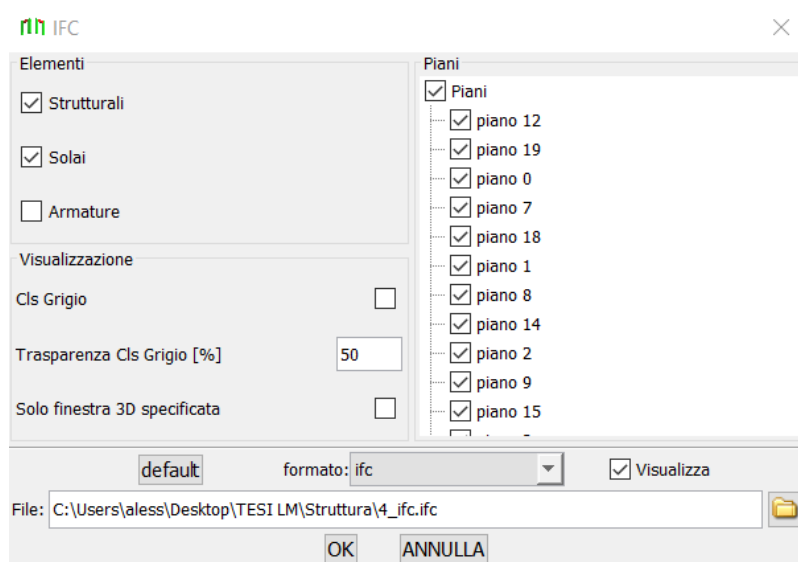


**Figura 3.32 – Diagramma verifiche totali SLU (max 0.997)**



**Figura 3.33 – Diagramma verifiche geometriche totale (max 1.000).**

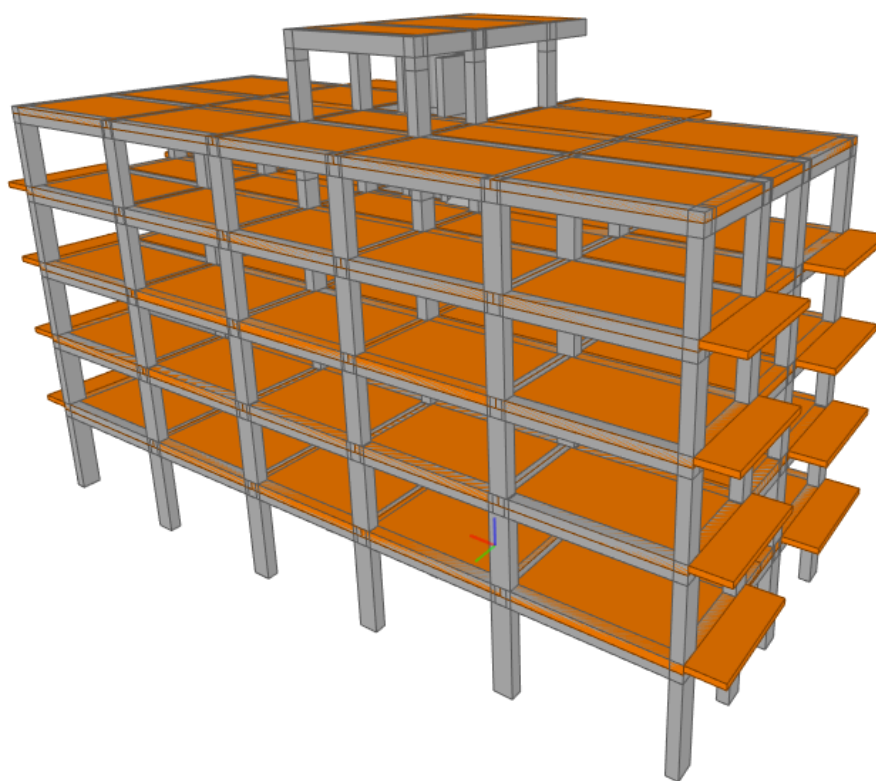
Il modello strutturale è stato successivamente esportato in formato IFC da Jasp (*esecutivi>esporta ifc*). Il formato di esportazione è un IFC 2x3 ma non si conosce nulla riguardo l'MVD utilizzata dal software, in quanto non indicata dalla software house. Da un'analisi del database di buildingSMART dei software certificati IFC, non è stato neanche possibile rilevare questo dato in quanto il software non ha conseguito la certificazione IFC. Nell'interfaccia di esportazione è possibile filtrare gli elementi da esportare, scegliendo tra le categorie strutturali, solai e armature, e è inoltre possibile selezionare i piani da esportare e modificare alcuni aspetti grafici del modello IFC. In fase di esportazione sono stati generati due modelli separati, così da avere una migliore gestione dei dati nelle fasi successive. In un modello sono stati selezionati solamente gli elementi struttura e solai (Figura 3.34), un altro modello IFC è stato dedicato esclusivamente alle armature della struttura. I modelli IFC, ottenuti con Jasp (Figure 3.35 -3.36) sono stati visualizzati con BIMvision, un visualizzatore IFC indicato dalla software house di Jasp.



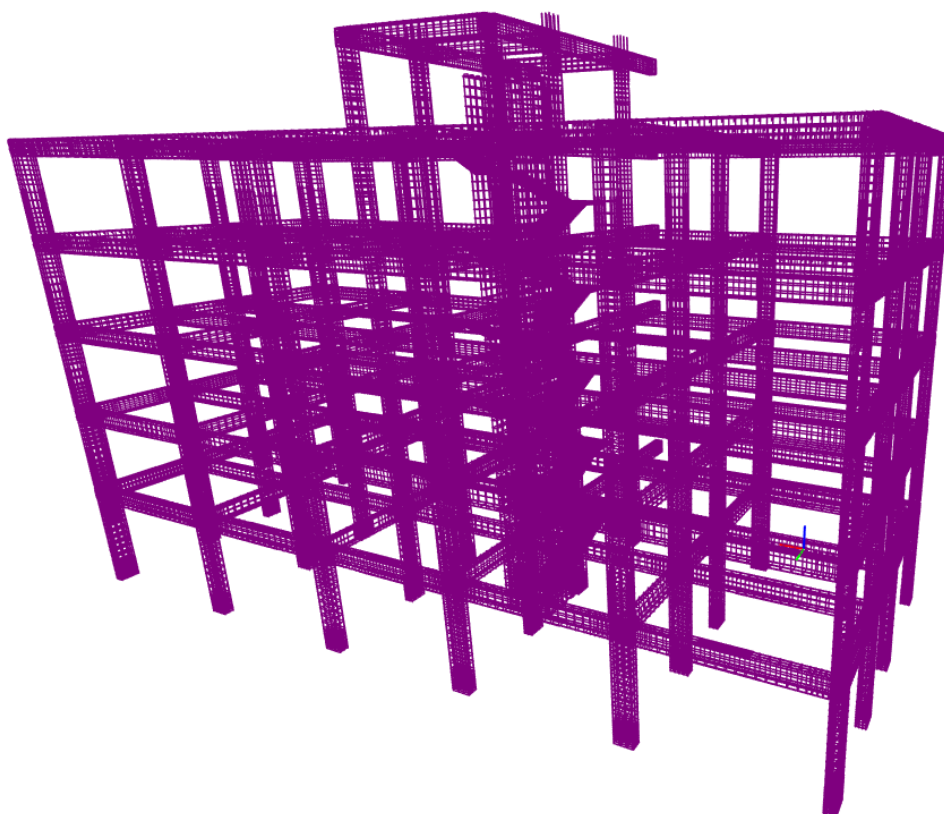
**Figura 3.34 – Menu di esportazione file IFC di Jasp.**

Il modello strutturale è stato successivamente importato su Revit 2021 (*inserisci>collega IFC*), così da poter procedere alla costruzione del modello architettonico del fabbricato. Effettuando una comparazione con il modello visualizzato su BIMvision, nell'importazione del modello strutturale in Revit 2021 sono stati rilevati alcuni errori di interpretazione dei dati. Al fine di investigare sul perché di questi errori di interpretazione è stato condotto un test comparativo di visualizzazione. In questo modo è stato possibile verificare se le informazioni presenti nel file IFC fossero andate perdute durante la fase di importazione a causa di una cattiva interpretazione del file da parte del software.





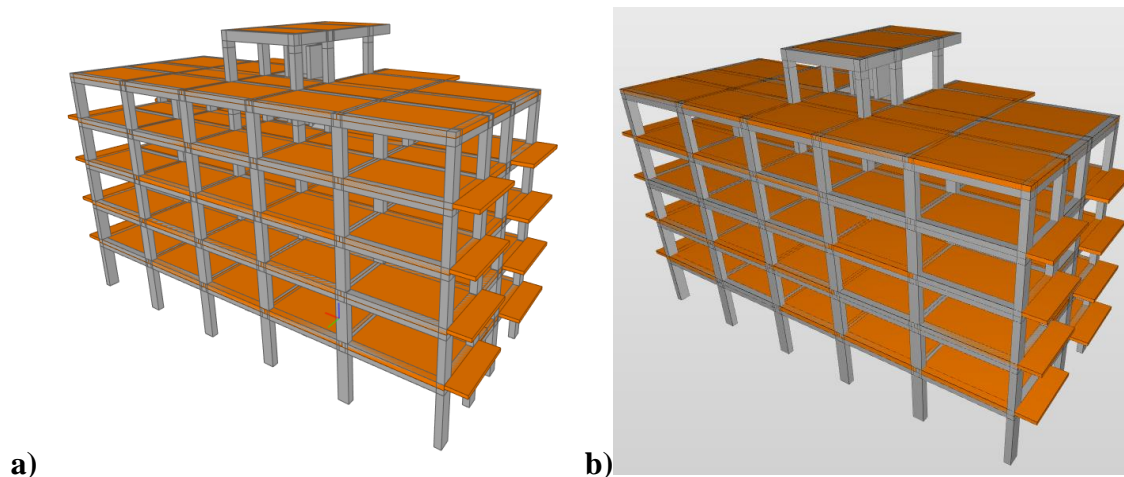
**Figura 3.35 – Modello IFC 2x3 della struttura con i solai, esportato da Jasp 7.5.**



**Figura 3.36 - Modello IFC 2x3 dell'armatura, esportato da Jasp 7.5.**

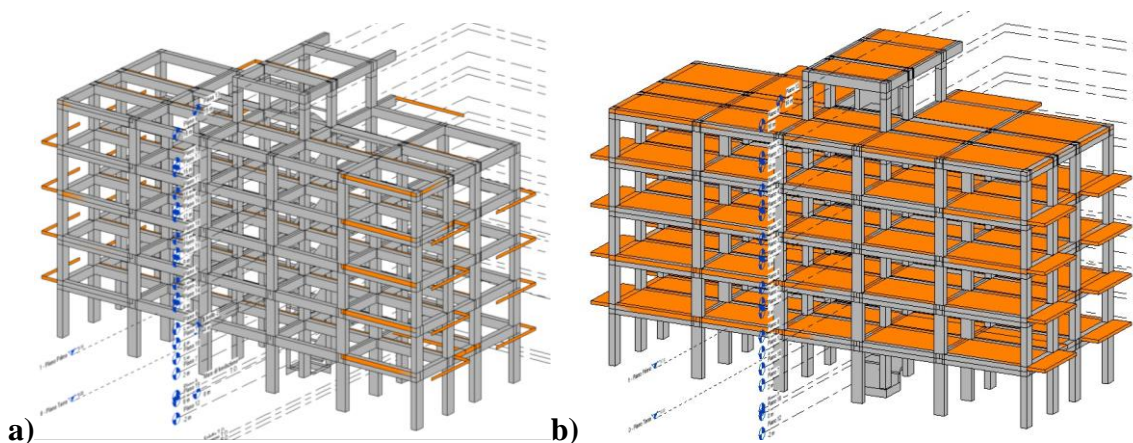
Per la comparazione dell'interpretazione dati del modello strutturale sono stati utilizzati i visualizzatori IFC BIMvision e Solibri Anywhere, il software Revit nelle versioni 2021 e 2024 e il software Navisworks nelle versioni 2021 e 2024.

Dal test si osservano differenze importanti nell'interpretazione dei dati dei diversi software. Tra i due visualizzatori IFC non si riscontrano differenze nei modelli importati (Figura 3.37).



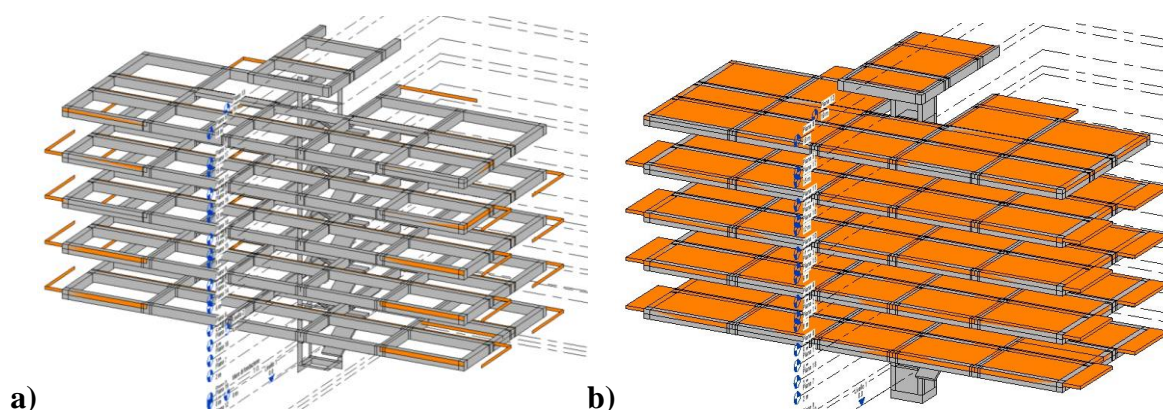
**Figura 3.37 - Modello 3D strutturale in formato IFC2x3, ottenuto con Jasp 7.5 ed importata nei visualizzatori IFC: a) BIMvision 2.27.5; b) Solibri Anywhere 9.13.5.**

Risultati molto diversi, invece, si sono ottenuti con la visualizzazione del modello IFC su Revit. Nel dominio architettonico di Revit 2021, nel file IFC collegato non sono stati visualizzati i solai ed i balconi sono stati rappresentati in modo errato (Figura 3.38a). L'importazione dello stesso modello su Revit 2024 invece non ha mostrato errori nell'interpretazione delle informazioni (Figura 3.38b).

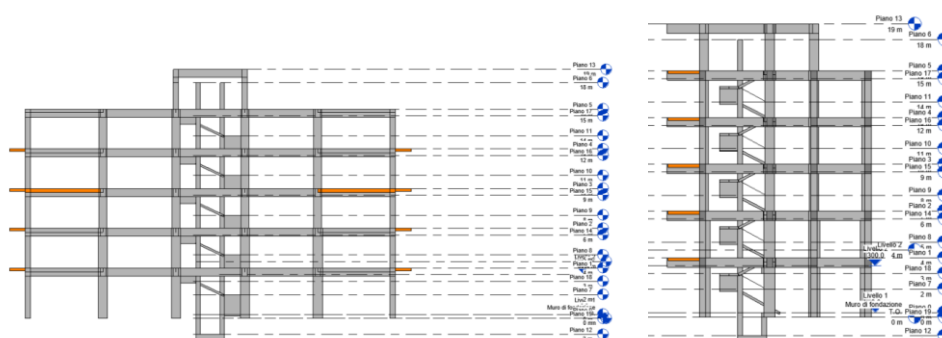


**Figura 3.38 - Modello 3D strutturale in formato IFC2x3, ottenuto con Jasp 7.5 ed importata nei software: a) Revit 2021 (dominio architettonico); b) Revit 2024 (dominio architettonico);**

La visualizzazione del file IFC nel dominio strutturale di Revit 2021 ha mostrato risultati differenti rispetto a quelli rilevati nel dominio architettonico. In questo caso, oltre a non interpretare correttamente solai e balconi, si sono anche perse totalmente le informazioni dei pilastri (Figura 3.39a). L'importazione dello stesso modello su Revit 2024 non ha mostrato errori nell'interpretazione di solai, balconi e travi, ma le informazioni dei pilastri sono anche in questo caso assenti (Figura 3.39b). In realtà si è potuto constatare che i problemi di interpretazione si sono verificati esclusivamente nella visualizzazione 3D modello, nelle viste laterali le informazioni dei pilastri sono ancora presenti (Figura 3.40).



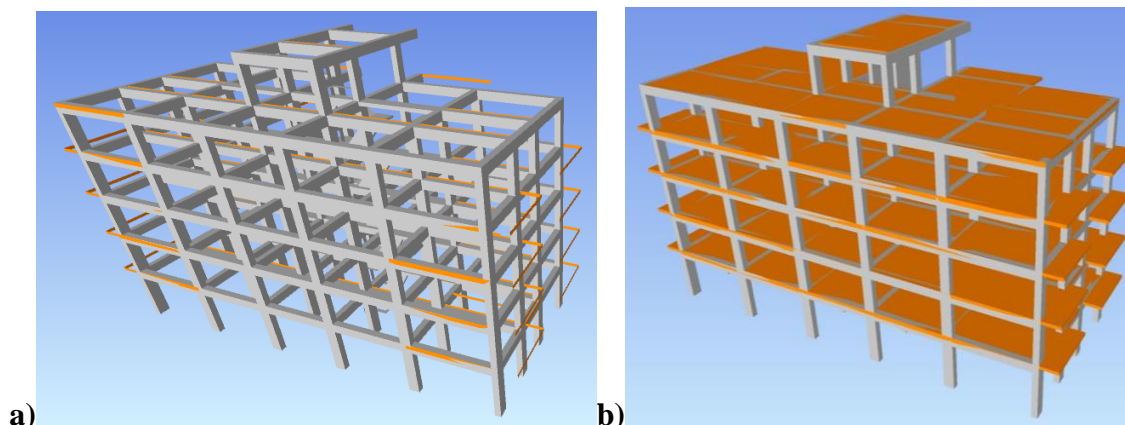
**Figura 3.39 – Modello 3D strutturale in formato IFC2x3, ottenuto con Jasp 7.5 ed importata nei software: a) Revit 2021 (dominio strutturale); b) Revit 2024 (dominio strutturale);**



**Figura 3.40 – Viste laterali del modello strutturale IFC2x3, ottenuto con Jasp 7.5 ed importato nel software Revit 2021 (dominio strutturale).**

Un'ultima comparazione è stata condotta per mezzo del software Navisworks Manage, ottenendo risultati simili a quelli già visti nella comparazione del dominio architettonico di Revit (Figure 3.41a – 3.41b). Questo risultato è riconducibile al fatto che sia nel dominio architettonico di Revit, sia in Navisworks Manage vengono utilizzati gli stessi requisiti di scambio per l'importazione dei dati. Tale aspetto non è comunque verificabile in quanto

non sono disponibili informazioni certe sui requisiti di scambio utilizzati in Navisworks Manage, il software difatti non possiede una certificazione ufficiale IFC.



**Figura 3.41 – Modello 3D strutturale in formato IFC2x3, ottenuto con Jasp 7.5 ed importata nei software: a) Navisworks Manage 2021; b) Navisworks Manage 2024.**

Nel database di buidingSMART sui software certificati IFC è stato possibile solamente recuperare informazioni sui requisiti di scambio utilizzati da Revit (Tabella 24). Proprio da questa tabella è possibile individuare che i requisiti di scambio, implementati su Revit per l'importazione dei file IFC 2x3, avvengono con l'MVD *Coordination View 2.0*, sia per dominio strutturale che per quello architettonico. Questo aspetto impone delicate riflessioni per quanto riguarda le differenze di interpretazione dei dati fatti dal software nei due diversi domini (Figure 3.38 e 3.39).

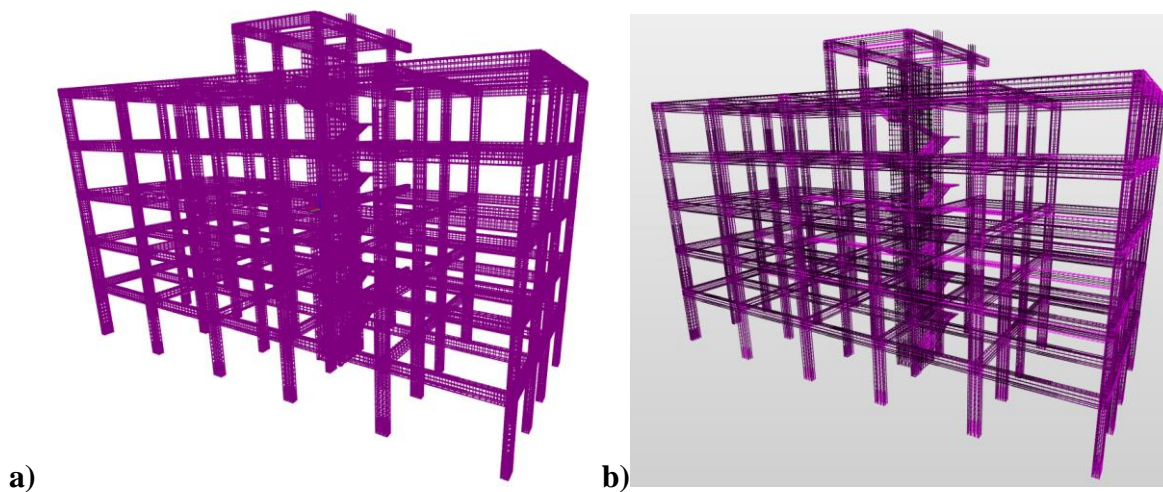
Dall'analisi comparativa è stato comunque rilevato che il miglioramento nell'interscambio dei dati di formato aperto IFC affianca lo sviluppo degli stessi software.



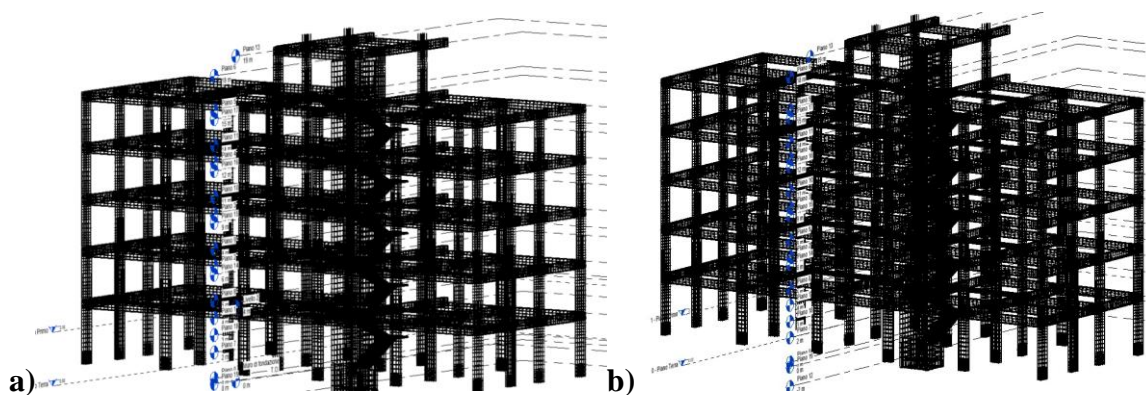
Venditore	Prodotto	Schema	Requisito di scambio	Importa/Esporta	Stato	Iniziato	Completato	Rapporto (collegamento)
Autodesk	Autodesk Revit	IFC4	Scambio di riferimenti architettonici	Importare	Finito	29-08-2017	2022-09-14	
Autodesk	Autodesk Revit	IFC4	Scambio di riferimenti architettonici	Esportare	Finito	29-08-2017	2020-10-19	
Autodesk-R	Autodesk RevitLT	IFC2x3	CV2.0	Importare	Finito	2013-07-17	26-07-2015	<a href="https://ifc2x3.b-cert.org/ords/ifc/certification/getCertification">https://ifc2x3.b-cert.org/ords/ifc/certification/getCertification</a>
Autodesk-R	Autodesk Revit MEP	IFC2x3	CV2.0	Importare	Finito	2012-05-06	26-07-2015	<a href="https://ifc2x3.b-cert.org/ords/ifc/certification/getCertification">https://ifc2x3.b-cert.org/ords/ifc/certification/getCertification</a>
Autodesk-R	Struttura di Autodesk Revit	IFC2x3	CV2.0	Importare	Finito	2012-05-09	26-07-2015	<a href="https://ifc2x3.b-cert.org/ords/ifc/certification/getCertification">https://ifc2x3.b-cert.org/ords/ifc/certification/getCertification</a>
Autodesk-R	Architettura di Autodesk Revit	IFC2x3	CV2.0	Importare	Finito	2010-04-30	2015-07-24	<a href="https://ifc2x3.b-cert.org/ords/ifc/certification/getCertification">https://ifc2x3.b-cert.org/ords/ifc/certification/getCertification</a>
Autodesk-R	Autodesk RevitLT	IFC2x3	CV2.0-Arch	Esportare	Finito	2013-07-17	2014-07-07	<a href="https://ifc2x3.b-cert.org/ords/ifc/certification/getCertification">https://ifc2x3.b-cert.org/ords/ifc/certification/getCertification</a>
Autodesk-R	Architettura di Autodesk Revit	IFC2x3	CV2.0-Arch	Esportare	Finito	2010-04-30	2013-04-16	<a href="https://ifc2x3.b-cert.org/ords/ifc/certification/getCertification">https://ifc2x3.b-cert.org/ords/ifc/certification/getCertification</a>
Autodesk-R	Autodesk Revit MEP	IFC2x3	CV2.0-MEP	Esportare	Finito	2012-05-06	2013-07-11	<a href="https://ifc2x3.b-cert.org/ords/ifc/certification/getCertification">https://ifc2x3.b-cert.org/ords/ifc/certification/getCertification</a>
Autodesk-R	Struttura di Autodesk Revit	IFC2x3	CV2.0-Struttura	Esportare	Finito	2012-05-09	2013-04-16	<a href="https://ifc2x3.b-cert.org/ords/ifc/certification/getCertification">https://ifc2x3.b-cert.org/ords/ifc/certification/getCertification</a>
Autodesk	Autodesk Revit	IFC4	Scambio di riferimenti MEP	Esportare	Finito	2020-08-12	27-04-2022	
Autodesk	Autodesk Revit	IFC4	Scambio di riferimenti strutturali	Esportare	Finito	29-08-2017	2020-11-09	

**Tabella 24 – Certificazioni IFC di Revit (<https://www.buildingsmart.org/compliance/software-certification/certified-software/> - ultimo aggiornamento del 27-07-2023).**

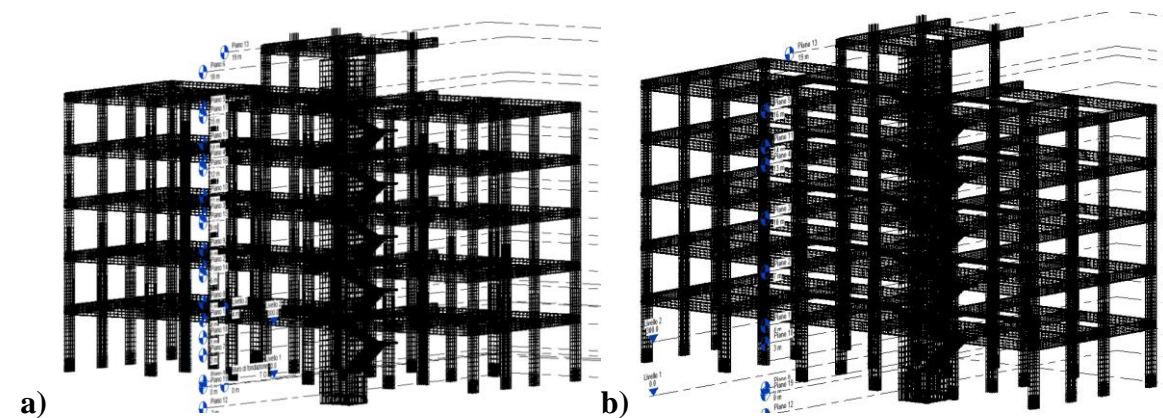
La stessa analisi di comparazione è stata effettuata per il modello IFC delle armature. Nelle figure da 3.42 a 3.45, vengono mostrati i risultati dell'interpretazione delle informazioni ottenute con i diversi software. Confrontando attentamente i modelli ottenuti, in questo caso si non si rilevano errori di interpretazione delle informazioni in nessuno dei casi analizzati.



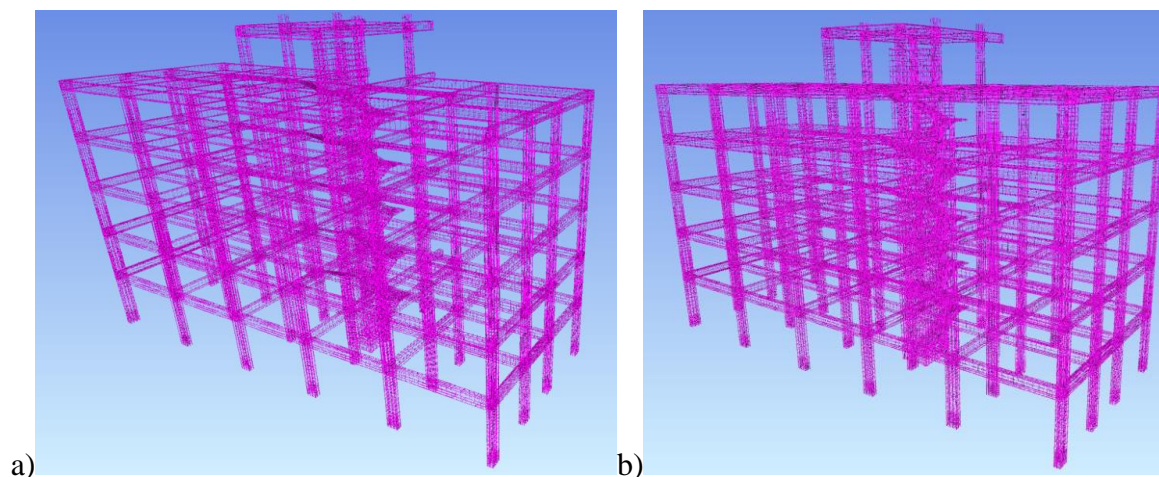
**Figura 3.42 – Modello 3D armature in formato IFC2x3, ottenute con Jasp 7.5 ed importata nei visualizzatori IFC: a) BIMvision 2.27.5; b) Solibri Anywhere 9.13.5.**



**Figura 3.43 - Modello 3D armature in formato IFC2x3, ottenute con Jasp 7.5 ed importata nei software: a) Revit 2021 (dominio architettonico); b) Revit 2024 (dominio architettonico);**



**Figura 3.44 - Figura 3.39 – Modello 3D armature in formato IFC2x3, ottenute con Jasp 7.5 ed importata nei software: a) Revit 2021 (dominio strutturale); b) Revit 2024 (dominio strutturale);**

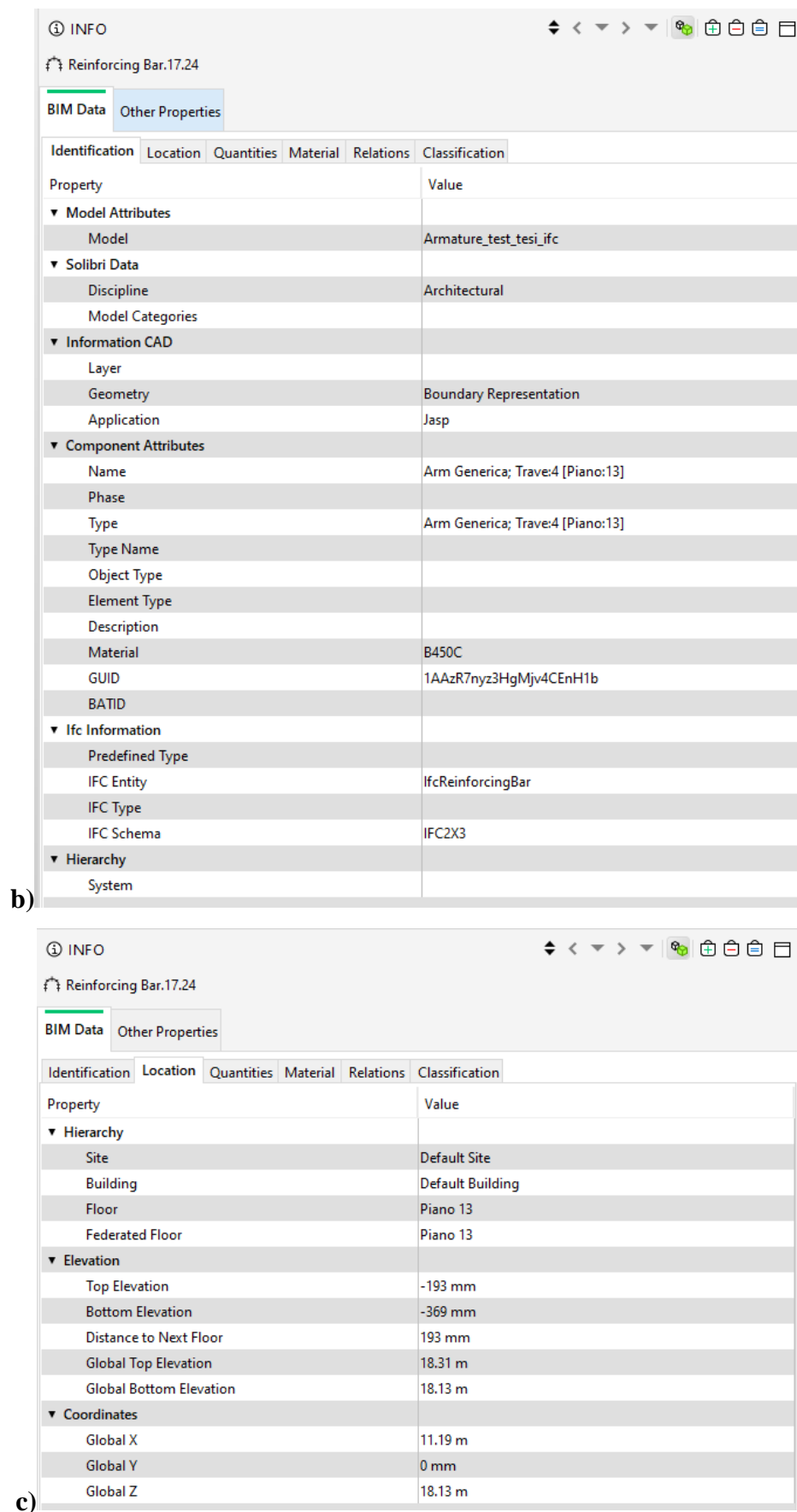


**Figura 3.45 - Modello 3D armature in formato IFC2x3, ottenute con Jasp 7.5 ed importata nei software: a) Navisworks Manage 2021; b) Navisworks Manage 2024**

Con il visualizzatore Solibri Anywhere è stato possibile indagare sulle informazioni che sono contenute nel file IFC delle armature. Selezionando una qualsiasi elemento si risale alle informazioni della stessa. È interessante notare che oltre alle informazioni geometriche vengono trasferite correttamente anche le informazioni relative al materiale (Figura 3.46b). Come è possibile vedere dalle informazioni del file IFC, le barre di armatura sono create come entità *IfcReinforcingBar* nello schema IFC2x3; viene anche riconosciuto il software di generazione e la disciplina, qualificata come architettonica (Figura 3.46b). Ulteriori informazioni reperibili dal file sono il diametro delle barre (Figura 3.46a), il piano di appartenenza di ogni barra e le indicazioni di posizionamento della stessa (Figura 3.46c).

a)

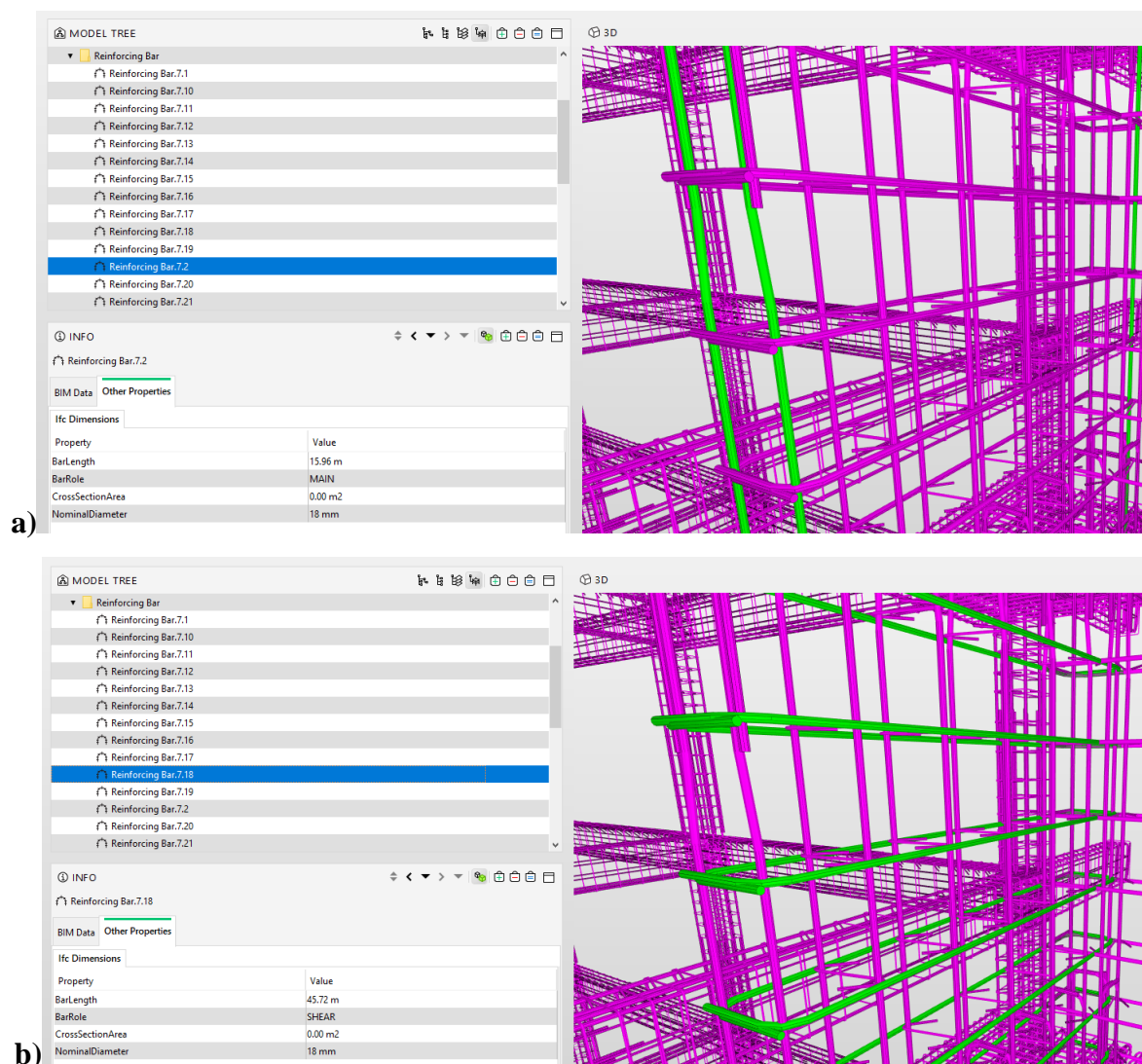
INFO	
Reinforcing Bar.17.24	
BIM Data	Other Properties
Ifc Dimensions	
Property	Value
BarLength	19.66 m
BarRole	NOTDEFINED
CrossSectionArea	0.00 m2
NominalDiameter	12 mm



**Figura 3.46 - Informazioni barra armatura presenti nel file IFC creato con Jasp e visualizzato con Solibri Anywhere 9.13.5.**



Con il visualizzatore Solibri Anywhere, è stato altresì possibile visualizzare in modo dettagliato i gruppi di barre ed individuarne il ruolo delle stesse. Nel file IFC generato con Jasp sono stati assegnati rispettivamente il ruolo principale (*main*) per le barre longitudinali (Figura 3.47a), il ruolo di taglio (*shear*) per le staffe (Figura 3.47b) e il ruolo di legatura (*ligature*) agli spilli.



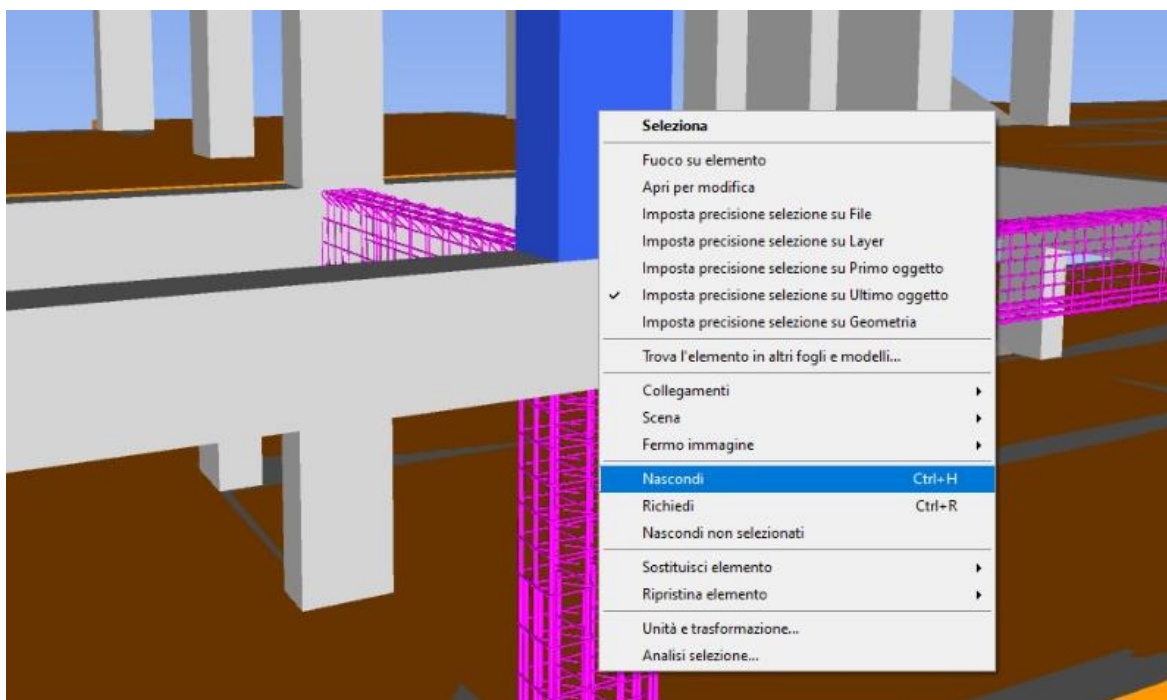
**Figura 3.47 – Viste di dettaglio dei gruppi di barre con le proprietà delle stesse.**

Analogamente a quanto svolto per le armature, sono state analizzate le informazioni del file IFC della struttura al fine di comprendere quali informazioni sono state preservate nel trasferimento al visualizzatore Solibri Anywhere. Per questo modello sono state generate quattro tipologie di entità: *IfcColumn* per i pilastri; *IfcBeam* per le travi; *Ifcwall* per i muri in c.a.; *IfcSlab* per i solai, i balconi e le piastre. Anche in questo caso i materiali risultano correttamente trasferiti, ad eccezione dei solai e dei balconi, i quali vengono inseriti

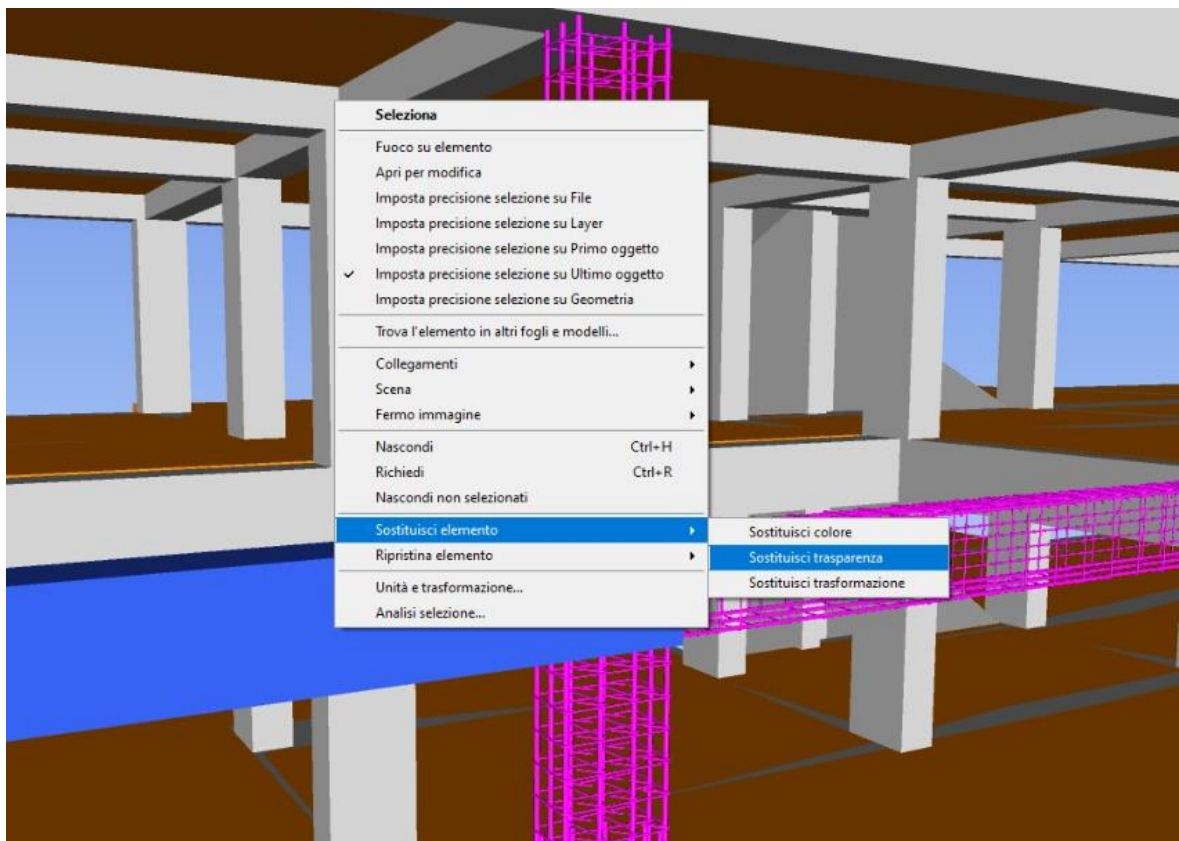
dall'input carichi nel programma Jasp. Invece, la piastra, pur essendo classificata con la stessa entità *IfcSlab*, ha preservato anche l'informazione del materiale. Questo è dovuto probabilmente al fatto che nel software Jasp la piastra è stata creata come elemento Shell.

Ulteriore analisi sugli output IFC di Jasp è stata eseguita con la ricerca delle interferenze geometriche, o *clash detection*, degli stessi modelli. Per effettuare l'individuazione delle *clash* è stato utilizzato il software Navisworks Manage 2024, in quanto non ha riportato errori di interpretazione dei dati su entrambi i modelli IFC strutturali.

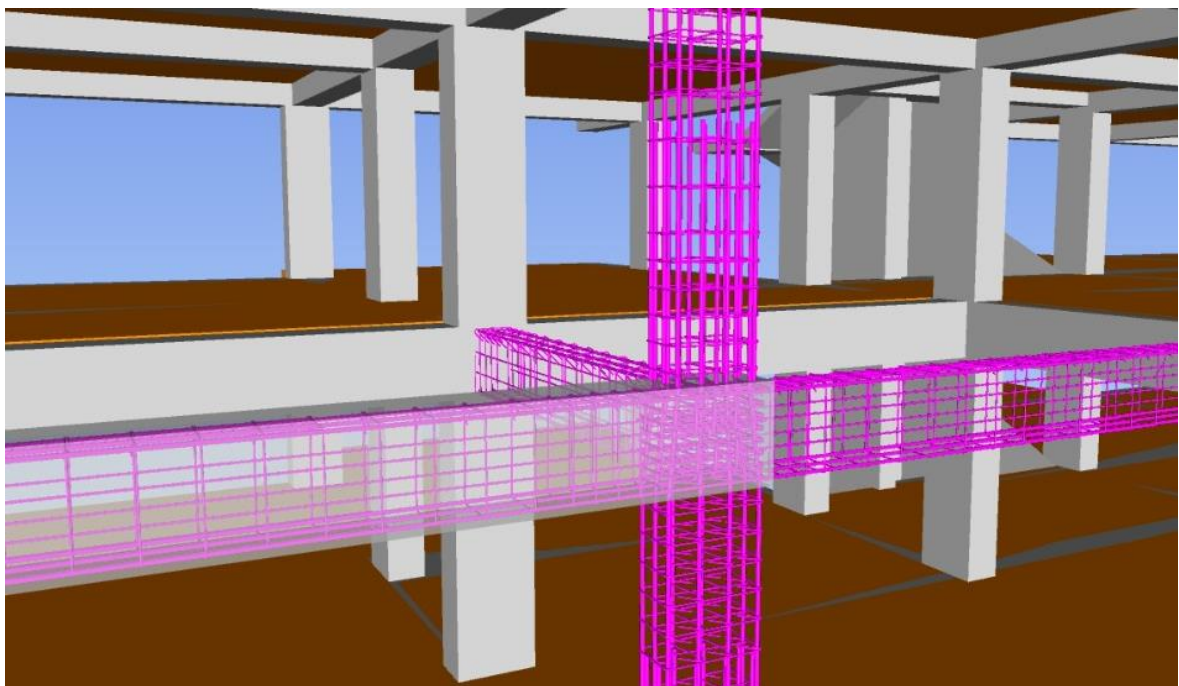
I due file IFC sono stati importati contemporaneamente all'interno del software Navisworks, ottenendo così un modello federato strutturale. Le armature si trovano collocate perfettamente all'interno della struttura in calcestruzzo. Infatti, nascondendo gli elementi componenti la struttura in calcestruzzo (Figura 3.48), è possibile visualizzare le barre di armatura all'interno dell'elemento stesso. Ulteriori opzioni sono disponibili per poter sostituire i colori degli elementi o modificarne la trasparenza (Figure 3.49 e 3.50).



**Figura 3.48 – Opzioni elemento su Navisworks 2021: comando nascondi.**



**Figura 3.49 - Opzioni elemento su Navisworks 2021: comando trasparenza.**

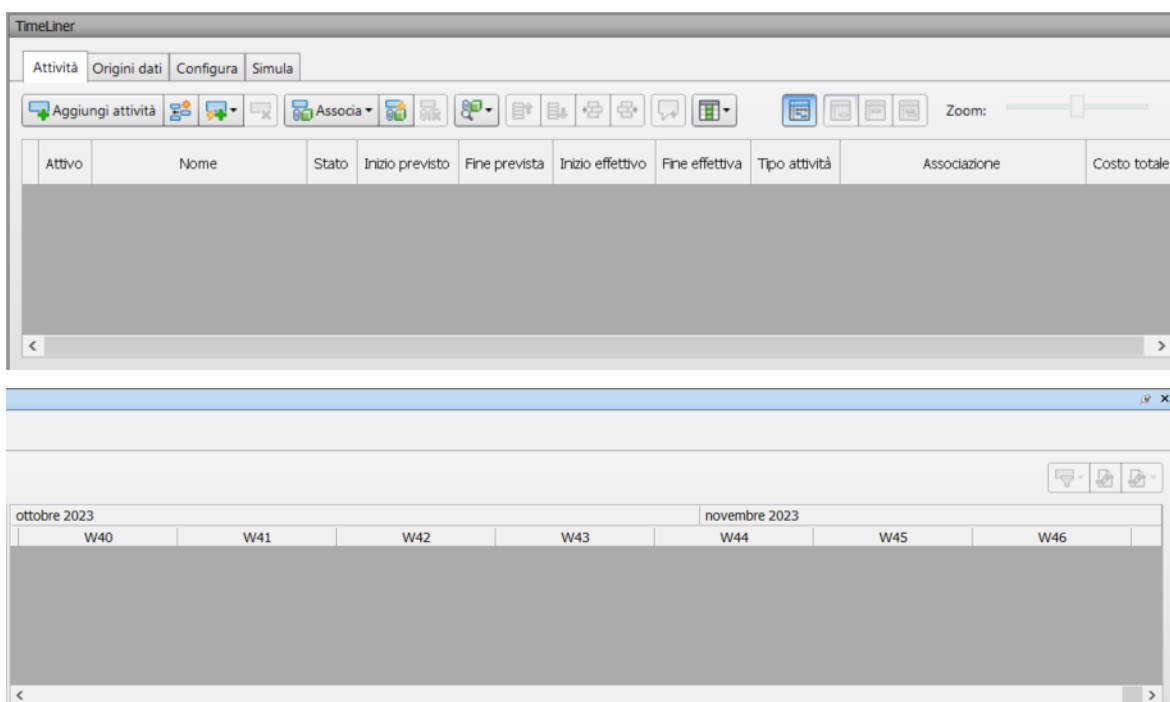


**Figura 3.50 – Vista del file strutturale federato su Navisworks 2021.**

Le funzioni di questo software sono molteplici. Ad esempio, associando il parametro tempo ai singoli oggetti, o gruppi di oggetto, è possibile simulare la fase di costruzione

della stessa opera edilizia, potendo effettuare vere e proprie simulazioni della cantierizzazione dell'opera. L'informazione del tempo agli elementi dà la possibilità quindi di ottenere quello che è stato definito come BIM 4D, ovvero la quarta dimensione del BIM. Per mezzo delle informazioni temporali, il software è in grado di creare un diagramma di Gant dinamico e modificabile durante le fasi di costruzione dell'opera. Al modello 4D è possibile aggiungere anche elementi temporanei come casseformi, ponteggi metallici, mezzi di costruzione, così da rendere la simulazione più reale ed ottenere un maggiore controllo sull'evoluzione del cantiere.

Oltre ai tempi Navisworks consente di associare il parametro costo agli elementi del modello BIM permettendo il raggiungimento della quinta dimensione del BIM (5D) (Figura 3.51).



**Figura 3.51 – TimeLiner di Navisworks per l'assegnazione dei tempi e costi agli elementi componenti il modello.**

Come già anticipato, l'utilizzo di Navisworks nel presente lavoro di tesi si è limitato all'analisi delle interferenze (Figura 3.52). In particolare sono state analizzate le interferenze dei singoli modelli e quelle relative al modello combinato (Figure 3.53 – 3.55).



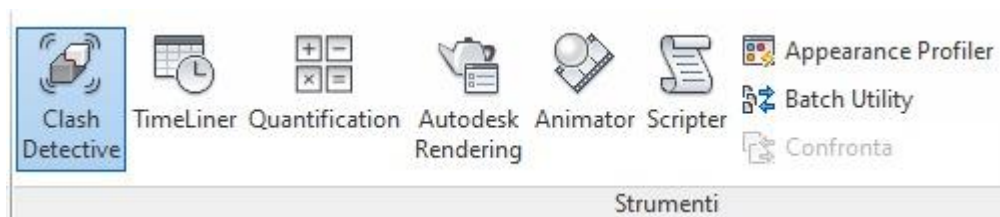


Figura 3.52 – Comando *Clash Detective* di Navisworks 2024.

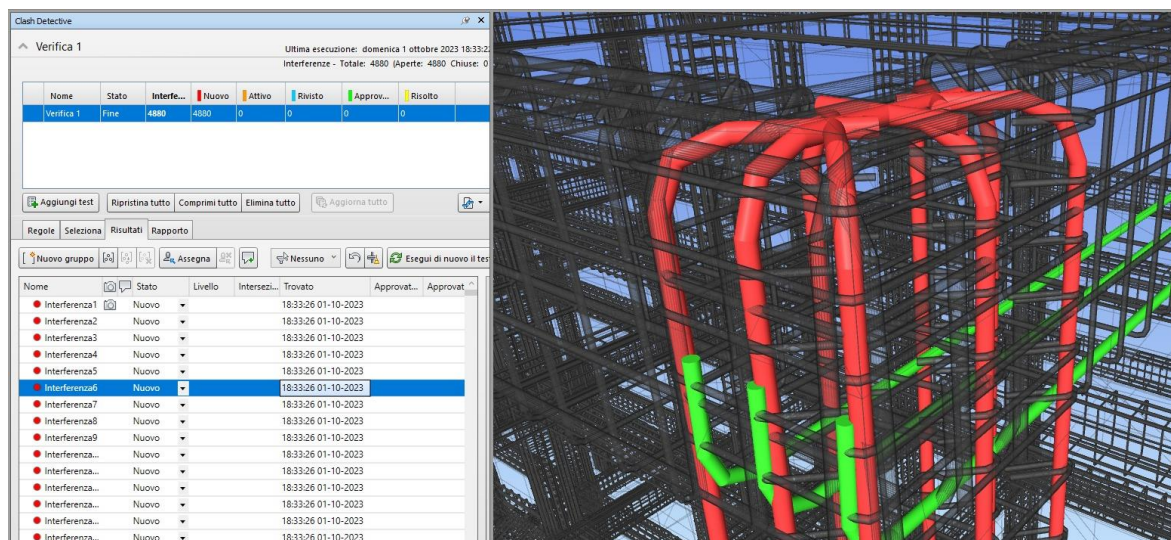


Figura 3.53 – Interferenze tra le barre di armatura.

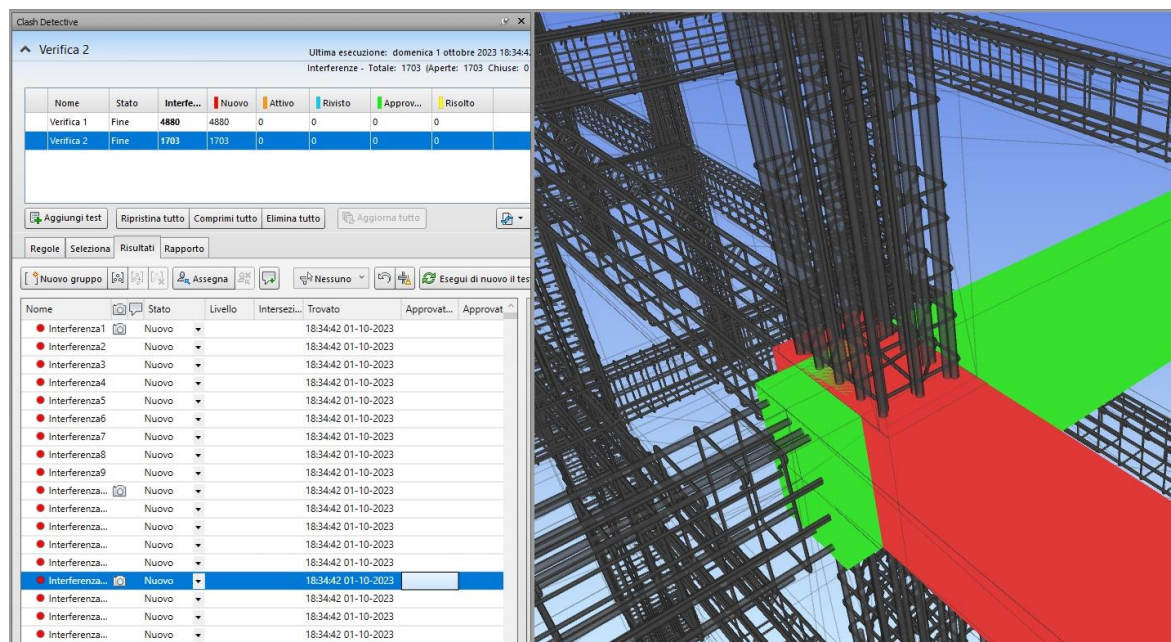
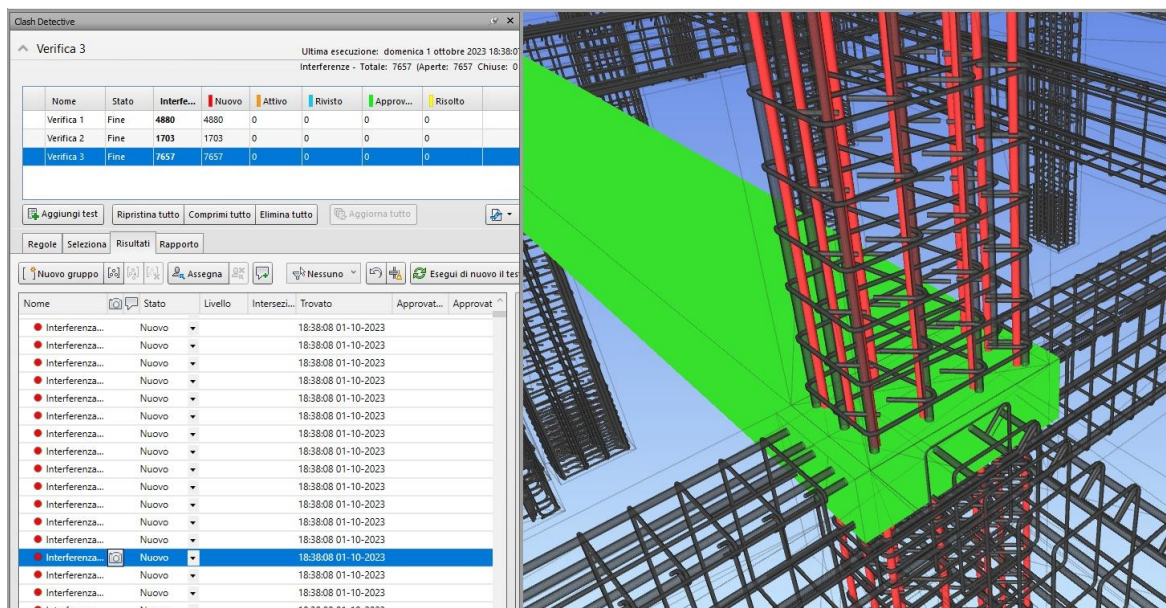


Figura 3.54 – Interferenze tra le travi in cls.



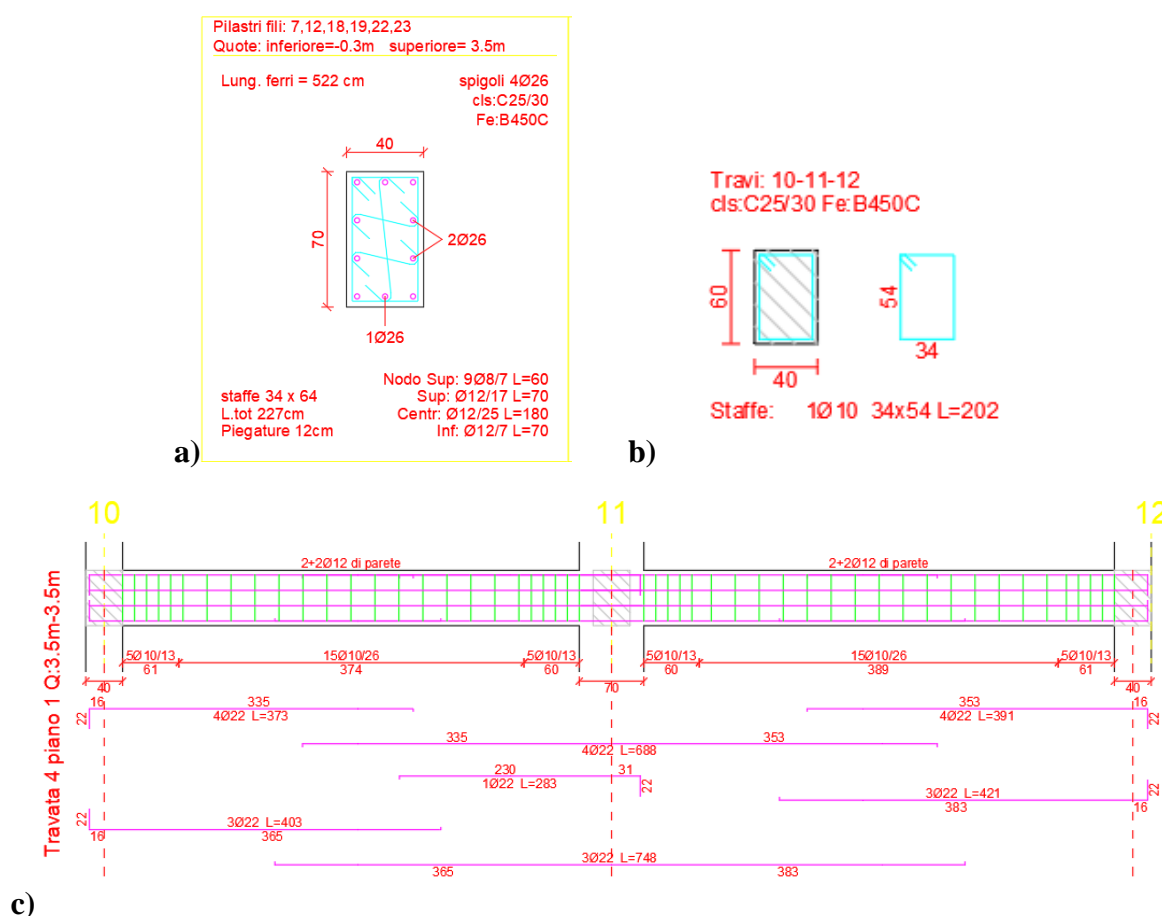
L'analisi condotta ha portato a rilevare molteplici interferenze tra gli elementi e quasi tutte nei nodi. Navisworks effettua un'analisi delle compenetrazioni dei diversi oggetti componenti il modello, o i modelli nel caso di *clash detection* combinata. In Figura 3.55 è possibile appunto osservare che la *clash* segnalata dal software nella realtà non è un'interferenza. Il compito di selezionare le reali *clash* è rimandato al BIM Coordinator o Manager, che tramite la piattaforma di Navisworks ha anche la possibilità di gestire le stesse.

Diverso è il caso della sovrapposizione delle barre di armatura (Figura 3.53), e che sicuramente richiede una maggiore attenzione nell'analisi. Nella pratica costruttiva le barre di armatura sono a contatto ed inoltre la loro possibilità di flettersi consente piccoli adattamenti nelle fasi di assemblaggio. Tuttavia, in casi complessi, come i nodi o in altre strutture fortemente armate, si possono verificare situazioni in cui si riscontrano notevoli difficoltà nell'assemblaggio dell'armatura in cantiere. In questi casi, un'analisi preventiva delle interferenze riveste un ruolo molto importante, in quanto consente di valutare già in fase di progettazione delle soluzioni alternative e quindi la risoluzione preventiva delle

stesse. Anche in questo caso, la gestione delle *clash* spetta al BIM Manager, che ha il compito di inviare i report al reparto di competenza per la ricerca della soluzione più appropriata.

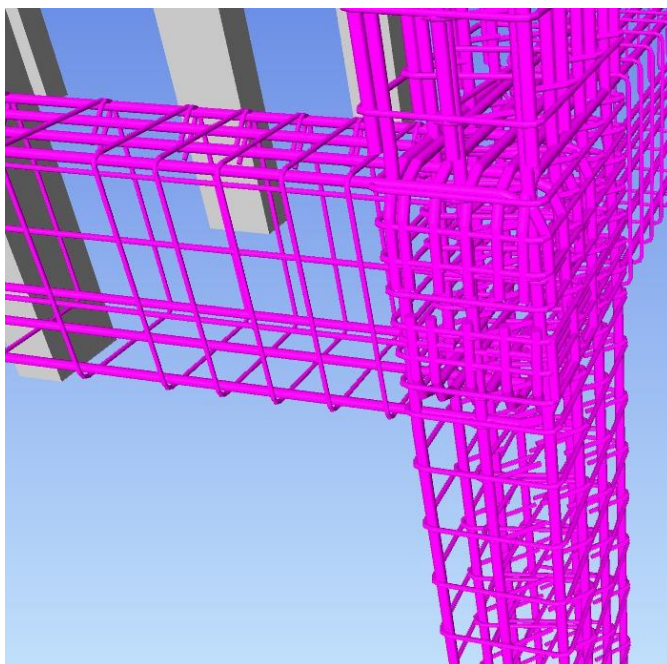
Come visto, la creazione di un modello strutturale 3D consente di esaminare approfonditamente la stessa già in fase di progettazione, attraverso simulazioni, rilevando i possibili conflitti che possono verificarsi in fase di costruzione. A questi non trascurabili benefici si aggiunge quello della visualizzazione dello stesso modello anche in cantiere. Questo ulteriore aspetto può rivelarsi molto importante per tutte quelle situazioni in si hanno dubbi sull'interpretazione dei disegni esecutivi in 2D. Ad oggi; infatti, sono disponibili applicazioni per dispositivi mobili che danno la possibilità di visualizzare i modelli in formato IFC direttamente in cantiere, rivelandosi quindi come un supporto attivo per la fase costruzione. Uno dei visualizzatori più impiegati è Solibri Anywhere, per tale ragione è stato considerato uno strumento importante all'interno del lavoro di tesi.

Si riportano a seguire degli esecutivi ottenuti con il programma Jasp (Figura 3.56) e il dettaglio 3D dell'armatura di un nodo (Figura 3.57), per dare l'idea d'interpretazione che si può ottenere combinando le due tecniche di rappresentazione.



**Figura 3.56 – Esecutivi ottenuti con il software Jasp 7.5: a) pilastro filo 12; b) sezione trasversale travata 10-11-12; c) sezione longitudinale travata 10-11-12.**





**Figura 3.57 – Dettaglio nodo piano primo, filo 12, visualizzato con Solibri Anywhere.**

### **3.3 Modello strutturale di Revit e test di interoperabilità**

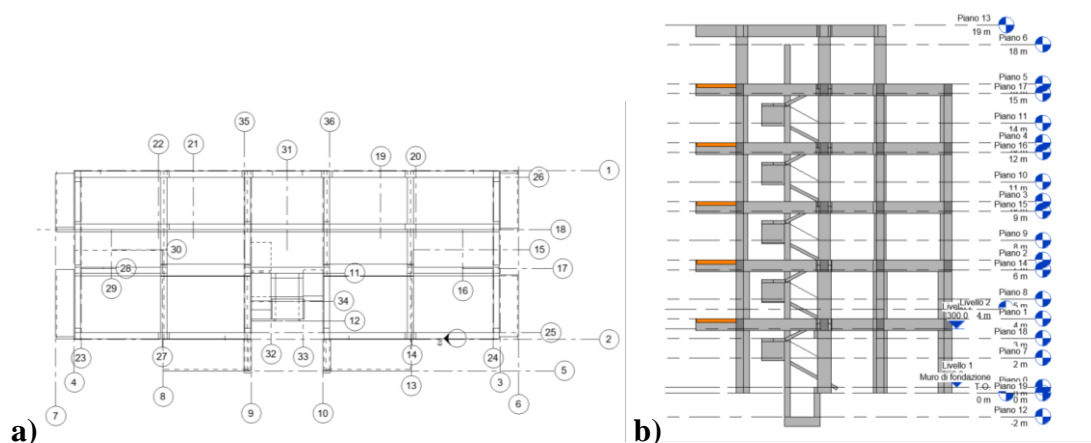
Come visto nel paragrafo precedente i dati del modello strutturale IFC, creato con Jasp, nella maggior parte dei casi analizzati vengono interpretati correttamente dai software in cui vengono importati. In particolar modo, il modello IFC dell'armatura è stata interpretata correttamente in tutti i casi analizzati. Questi modelli, quindi, potrebbero essere già utilizzati come base per il completamento del modello architettonico e successivamente anche per la creazione del modello federato dell'opera.

Tuttavia, dall'analisi dei modelli di Jasp si è visto che il modello strutturale esportato non risulta completo e quindi lo stesso necessita di ulteriori integrazioni. In particolare, nei modelli IFC esportati si nota che sia i balconi che i solai non presentano la rispettiva armatura e che l'armatura della scala, pur essendo stata calcolata, non si presenta collegata idoneamente agli altri elementi strutturali.

In questo lavoro si è deciso di modellare solamente una tipologia di balcone, fine di mostrare la funzionalità di inserimento manuale delle barre presente su Revit e, inoltre, per avere la possibilità di generare un modello federato con elementi di armatura provenienti da software diversi. La decisione di sviluppare nuovamente il modello strutturale anche su Revit è stata presa al fine di avere la possibilità di effettuare alcuni test sull'interoperabilità Revit-Robot, in cui è anche possibile il trasferimento delle informazioni tramite collegamento diretto da file nativo.



Analogamente a quanto fatto per la creazione del modello architettonico, è stato creato un nuovo file con disciplina strutturale su Revit, selezionando il comando nuovo *progetto>file di modello* (Figura 3.6). Nel file strutturale creato è stato impostato come collegamento il file architettonico (dal comando *inserisci>collega Revit*) in modo tale da avere i riferimenti iniziali per la costruzione del modello strutturale (Figura 3.58a). Oltre al file architettonico è stato importato il modello strutturale IFC creato con Jasp (dal comando *inserisci>collega IFC*). Quest'ultimo, pur non essendo interpretato in modo corretto (Figura 3.58 b), è stato di supporto alla creazione del modello strutturale su Revit, poiché nelle viste laterali presentava un'interpretazione corretta del modello di partenza (Figura 3.58 c).



**Figura 3.58 – File importati per la creazione del modello strutturale su Revit: a) pianta architettonica del piano tipo; b) vista laterale modello strutturale IFC creato con Jasp 7.5.**

Per la modellazione della struttura è stato necessario generare i livelli di inserimento. Gli stessi sono stati creati facendo riferimento a quelli del file IFC collegato (Figura 3.59).



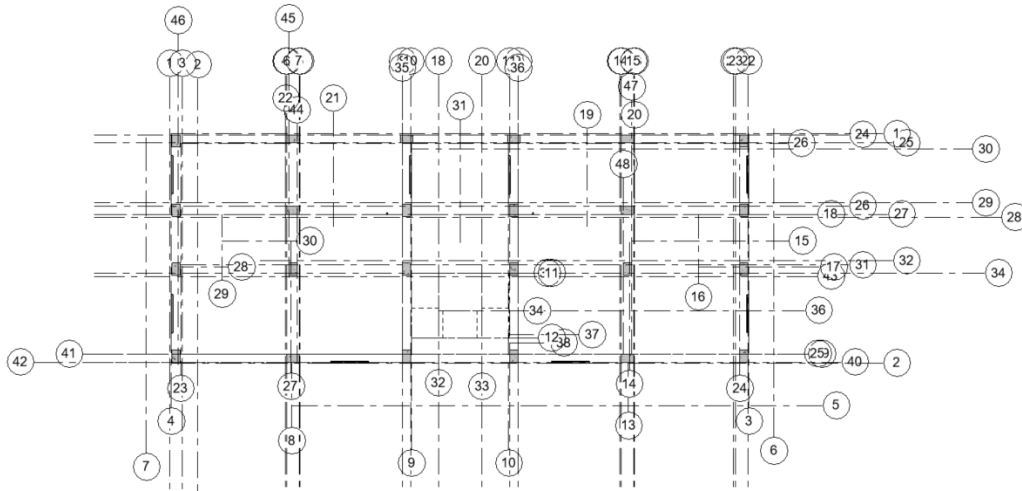
**Figura 3.59 – Creazione dei livelli su Revit per la creazione del modello strutturale.**

Partendo dai riferimenti in pianta ed elevazione, la prima operazione per la costruzione del modello strutturale su Revit è stata quella della creazione delle famiglie di pilastri e dell'inserimento degli stessi, in una vista di pianta (Figura 3.60).

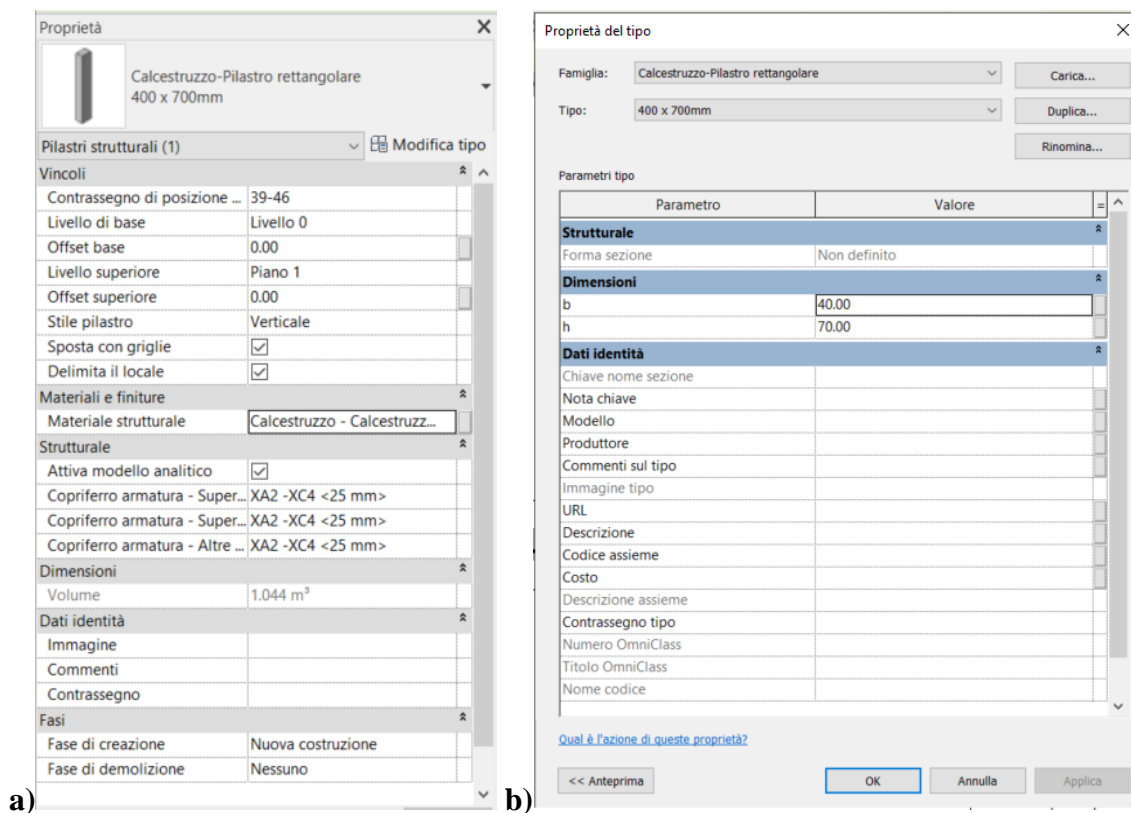
Nella parametrizzazione delle due famiglie parametriche di pilastri in calcestruzzo armato

(40x70 e 40x60) sono state incluse solamente informazioni strettamente necessarie all'oggetto delle analisi, ovvero quelle riguardanti le dimensioni ed il materiale (Figura 3.61a). Per le dimensioni degli elementi strutturali si è fatto riferimento al modello precedentemente dimensionato e verificato con Jasp 7.5.

Dall'interfaccia delle *proprietà del tipo* della *famiglia del pilastro* è comunque possibile inserire ulteriori parametri per la definizione dello stesso (Figura 3.61b).



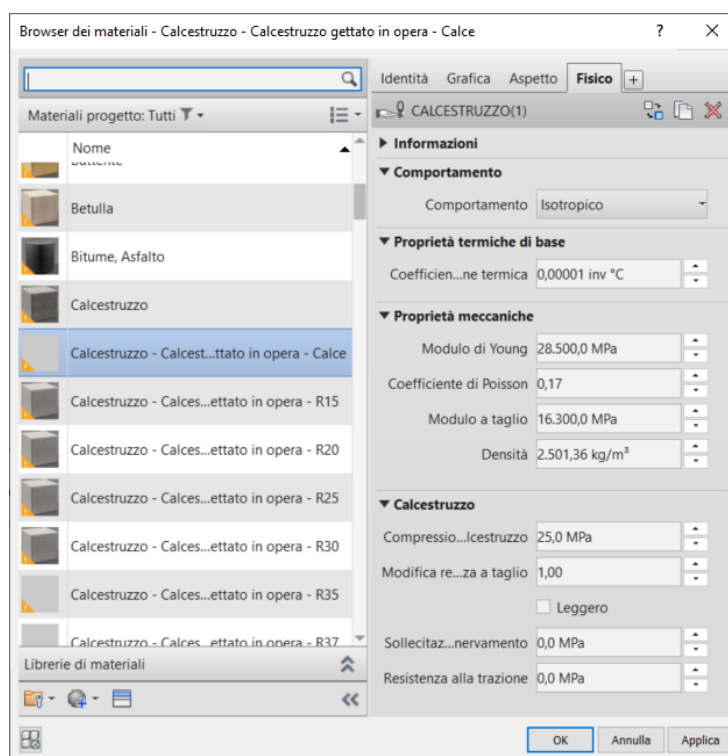
**Figura 3.60 – Inserimento dei pilastri sul modello strutturale di Revit.**



**Figura 3.61 – (a) Proprietà dell'oggetto pilastro; (b) Proprietà del tipo della famiglia pilastro;**

Il materiale è stato selezionato tra quelli disponibili nel *browser dei materiali*, che dispone di una libreria di materiali predefiniti e può essere integrata con ulteriori materiali. Nel software Revit, i materiali possono contenere informazioni relative all'aspetto e alla grafica, ma anche informazioni sulle loro caratteristiche fisiche, ovvero proprietà meccaniche, termiche e di comportamento (Figura 3.61). Il calcestruzzo scelto per i pilastri è di tipo ordinario con classe di resistenza C25/30.

Partendo dagli stessi oggetti strutturali che vengono inseriti nel modello, il software possiede la funzionalità di creare in automatico il modello di analisi (*modello analitico*), utilizzabile da altri software ai fini del calcolo e verifica della struttura.



**Figura 3.62 – Proprietà calcestruzzo dal browser materiali di Revit.**

Parallelamente all'inserimento dei pilastri sono state create le famiglie delle travi (40x60 – 80x25 – 30 x 60) strutturali, in cui sono state inserite tutte le informazioni ritenute necessarie, analogamente a come fatto per i pilastri strutturali (Figura 3.63). Anche le travi sono state inserite in una vista di pianta (Figura 3.64). Per la copia sui diversi livelli, sia per i pilastri che per le travi ci si è serviti dei comandi *copia negli appunti* ed *incolla ai livelli selezionati*, comando che velocizza la modellazione in quanto minimizza le operazioni di inserimento e di conseguenza i possibili errori nelle stesse.

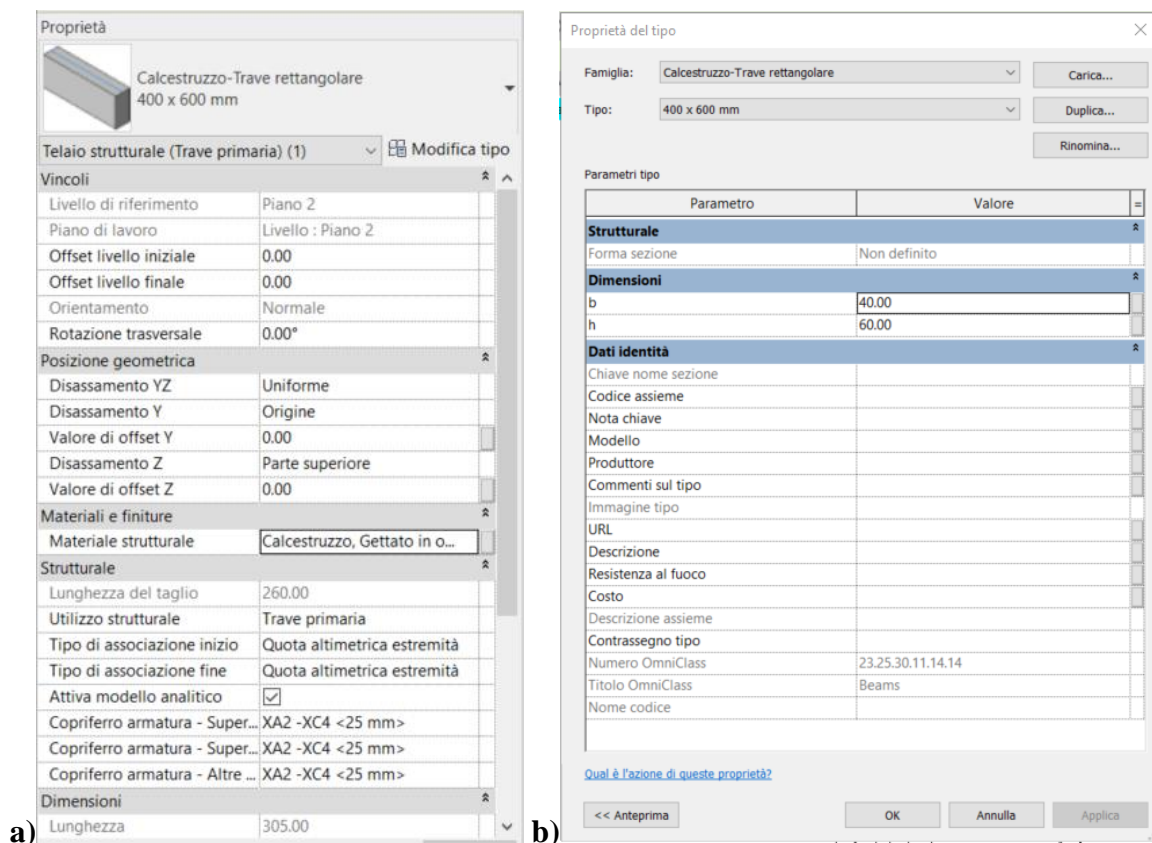


Figura 3.63 – (a) Proprietà dell'oggetto trave in cls; (b) Proprietà del tipo della famiglia trave in cls;

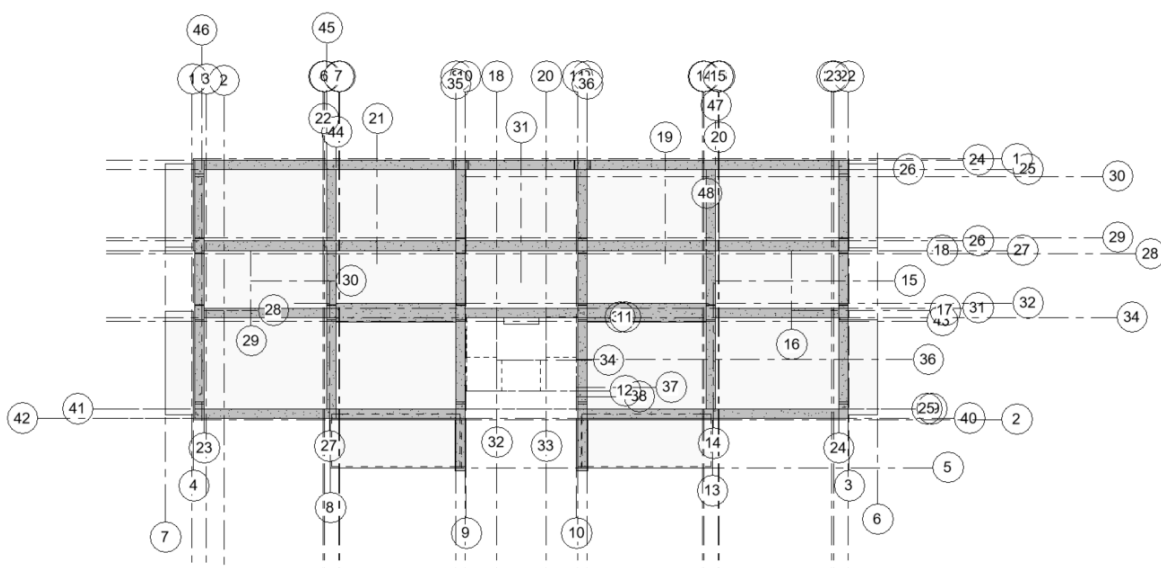


Figura 3.64 - Inserimento delle travi nel modello strutturale, creato con Revit.

Con l'inserimento di travi e pilastri per ogni livello di progetto, seguendo i riferimenti importati, è stato così possibile ottenere il modello della struttura a telaio dell'edificio (Figura 3.65).

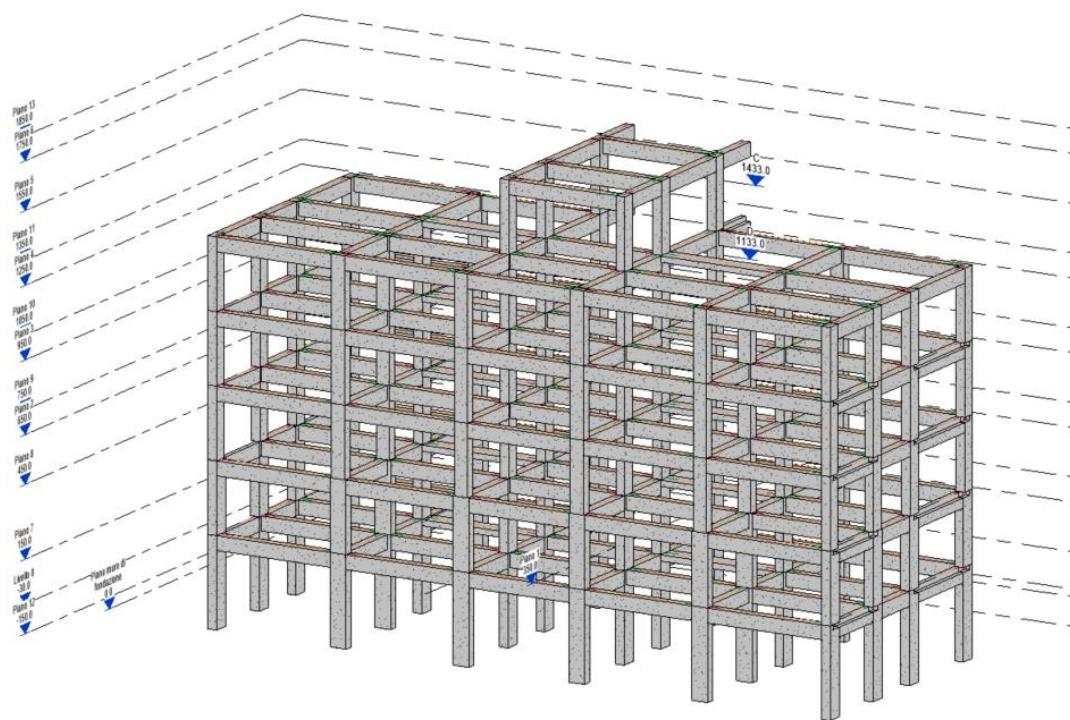


Figura 3.65 – Vista assonometrica della struttura a telaio dell’edificio.

Il modello strutturale in Revit è stato completato con l’inserimento dei balconi, inseriti come elemento soletta piena 20 cm, in cui verranno successivamente inserite manualmente le armature. Anche in Revit si riscontrano alcune limitazioni nella modellazione degli elementi strutturali, in questo caso ci si riferisce ai solai in laterocemento gettati in opera e alle scale.

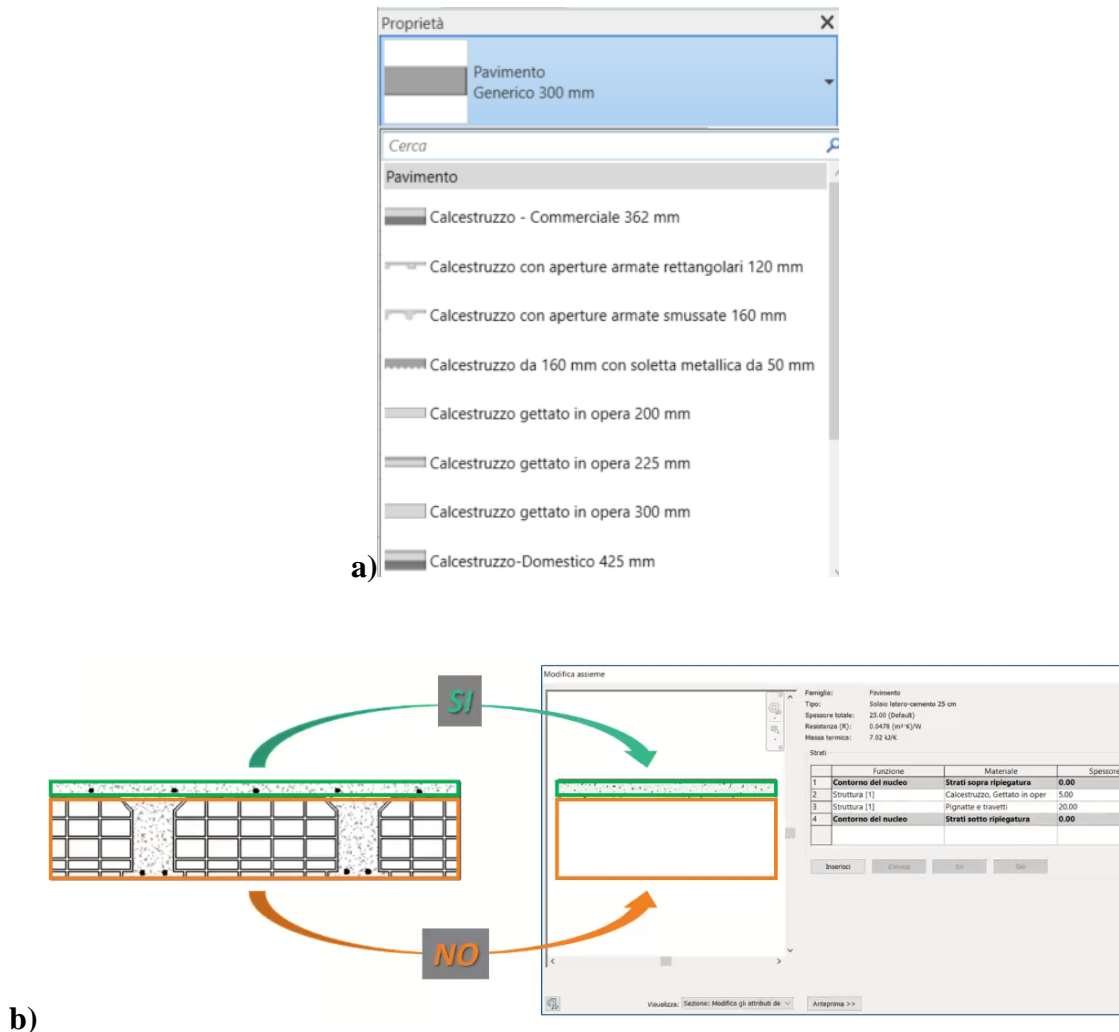
Una limitazione consiste nella creazione di un modello strutturale di solaio in laterocemento gettato in opera, ad un livello di dettaglio esecutivo LOD D (Figura 3.66).

Prospetto C. 16 Esempio di LOD solai in laterocemento						
LOD A	LOD B	LOD C	LOD D	LOD E	LOD F	LOD G
<b>Geometria</b> Elemento strutturale orizzontale o pseudo-orizzontale piano rappresentato mediante un simbolo 2D.	<b>Geometria</b> Elemento strutturale orizzontale o pseudo-orizzontale piano rappresentato mediante un solido di estrusione abbozzato.	<b>Geometria</b> Elemento strutturale orizzontale o pseudo-orizzontale piano rappresentato mediante un solido avente dimensioni calcolate secondo la normativa tecnica. Sono definite le armature e le solette collaboranti resistenti.	<b>Geometria</b> Elemento strutturale orizzontale o pseudo-orizzontale piano rappresentato mediante un solido avente dimensioni pari alle dimensioni reali. Sono modellate tutte le armature in posizione corretta, le forometrie e tipologie di travetto specifiche.	<b>Geometria</b> Elemento strutturale orizzontale o pseudo-orizzontale piano rappresentato mediante un solido avente dimensioni pari alle dimensioni reali. Sono incluse tutte le armature in posizione corretta, le forometrie, le tipologie di travetto, il produttore, i dati specifici del fornitore dei materiali e delle armature e la gestione dei getti.	<b>Geometria</b> Come LOD E (rilievo di quanto eseguito).	<b>Geometria</b> Nuovi interventi: Come LOD F (con aggiornamenti) Manutenzione e gestione su elementi esistenti: Come LOD C o D (a partire da).
<b>Oggetto</b> Simboli grafici 2D	<b>Oggetto</b> Solido 3D	<b>Oggetto</b> Solido 3D complesso	<b>Oggetto</b> Solidi 3D complessi	<b>Oggetto</b> Solidi 3D complessi	<b>Oggetto</b> Solidi 3D complessi	<b>Oggetto</b> Solidi 3D complessi
<b>Caratteristiche</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Posizionamento di massima</li> </ul>	<b>Caratteristiche</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Materiali ipotizzabili</li> <li>• Incidenza di armatura standard</li> </ul>	<b>Caratteristiche</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Materiali da calcolo</li> <li>• Incidenza di armatura calcolata</li> </ul>	<b>Caratteristiche</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Armature 3D</li> <li>• Forometrie</li> <li>• Dettagli costruttivi</li> </ul>	<b>Caratteristiche</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Alleggerimenti 3D reali</li> <li>• Gestione dei getti</li> </ul>	<b>Caratteristiche</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Certificati di collaudo</li> <li>• Piano di manutenzione</li> </ul>	<b>Caratteristiche</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Data di manutenzione/sostituzione</li> <li>• Soggetto manutentore</li> <li>• Tipologia di intervento</li> </ul>

Figura 3.66 – Esempio LOD solai in laterocemento, secondo la norma UNI 11337-4.



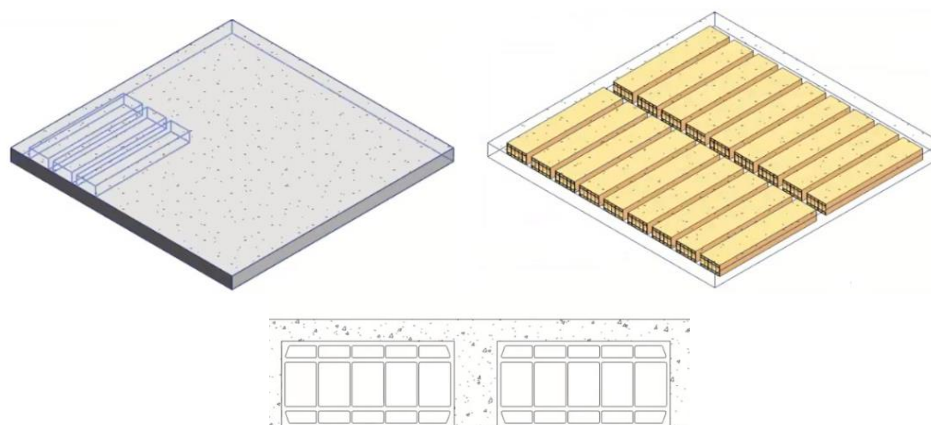
Revit dispone di un comando per la generazione del pavimento strutturale configurato come elemento stratigrafico (Figura 3.67a); forte limite consiste nel non poter ulteriormente caratterizzare il singolo strato (Figura 3.67b).



**Figura 3.67 – a) Tipologie di pavimenti strutturali disponibili su Revit; b) Limitazioni in Revit per il solaio strutturale in laterocemento (Fonte: Graitec Italia).**

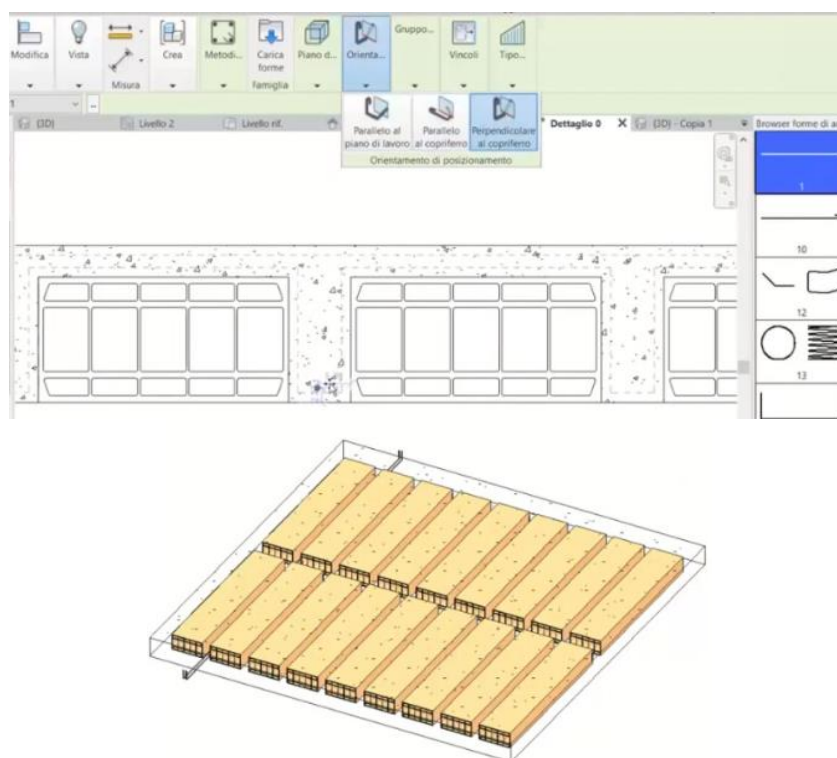
Il solaio gettato in opera si può dire che è caratterizzato da più elementi componenti e la sua configurazione risulta essere molto variabile (non è sempre a costante, può presentare delle fasce piene e semi piene, può includere un traghettto rompitratta).

Con il software è possibile creare un'apposita famiglia parametrica che includa anche le pignatte al suo interno (Figura 3.68), ma della stessa al momento non si hanno dimostrazioni sul corretto trasferimento delle informazioni al software di calcolo strutturale.

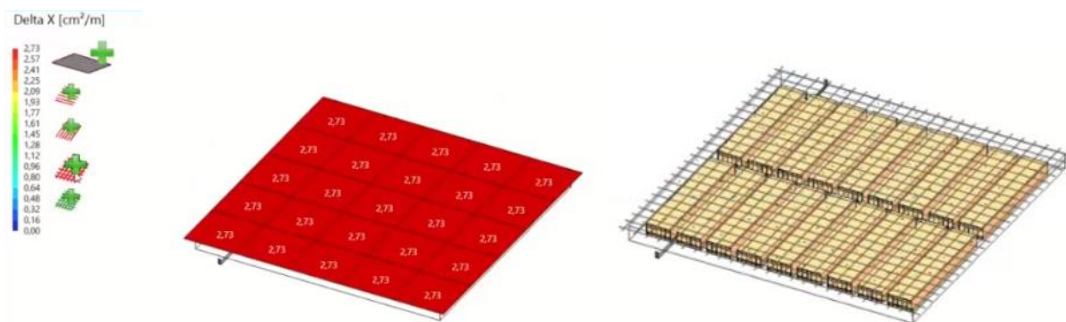


**Figura 3.68 – Esempio di famiglia parametrica di un solaio in laterocemento creato con Revit (Fonte: Graitec Italia).**

Una ulteriore problematica per questa tipologia di elemento è quella dell'inserimento delle barre di armatura in modo automatico, in quanto trattasi di operazione possibile esclusivamente manualmente (Figura 3.69). A supporto dell'inserimento manuale delle barre, la software house Graitec ha sviluppato un plug-in per Revit che consente per solamente per alcune tipologie di armature un inserimento di tipo semiautomatico (Figura 3.70).



**Figura 3.69 – Inserimento manuale delle barre di armatura del travetto con il software Revit (Fonte: Graitec Italia).**

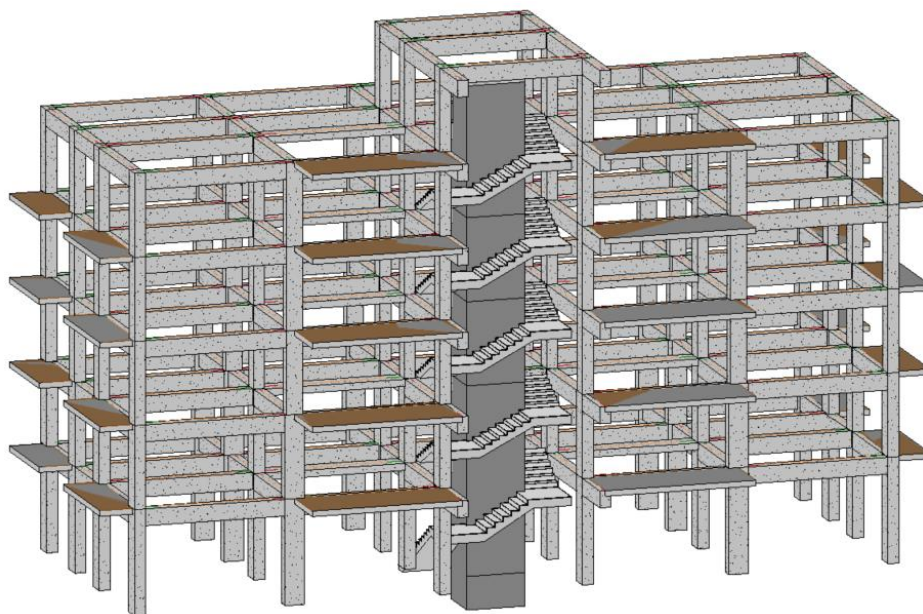


**Figura 3.70 – Inserimento semiautomatico dell’armatura della soletta con il plug-in PowerPack per Revit (Fonte: Graitec Italia).**

Il solaio in laterocemento su Revit è presente come elemento architettonico assimilabile ad un LOD B e un LOD C, in quanto non presenta neanche la reale rappresentazione delle pignatte ma solamente un’indicazione stratigrafica. I solai nel progetto saranno inseriti come modello architettonico con la conseguenza che sarà necessario un ulteriore inserimento delle informazioni nel software di analisi strutturale.

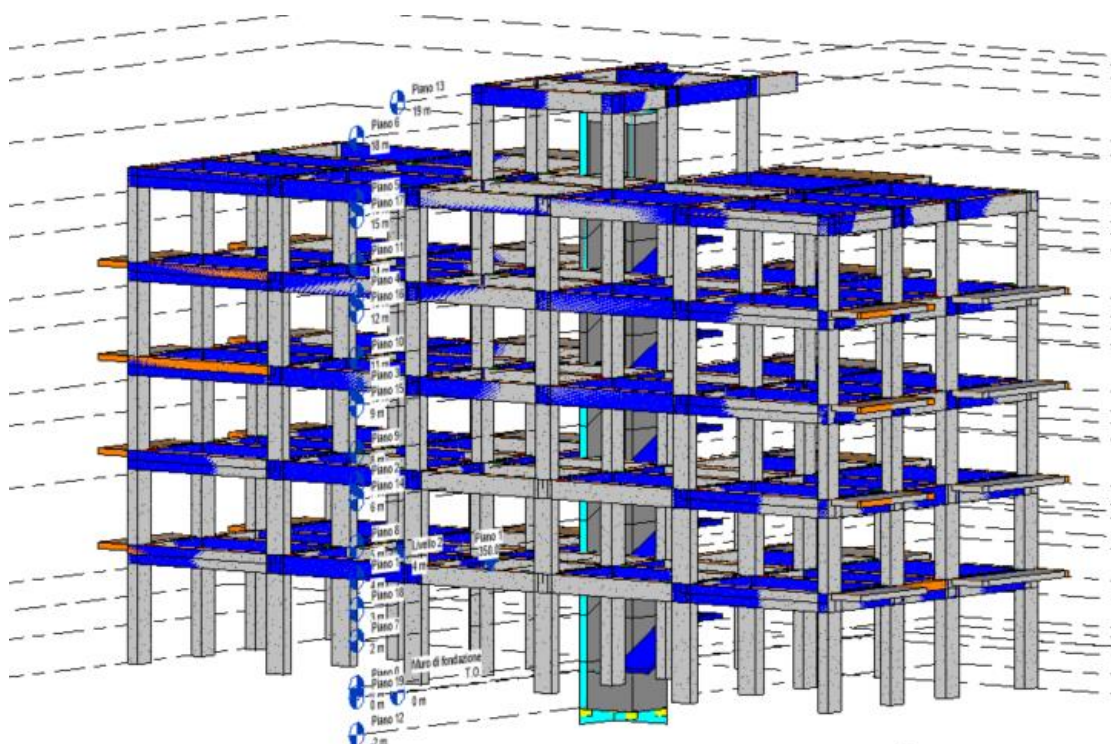
Anche le scale sono state inserite nel modello architettonico con la conseguenza di non trovare le rispettive informazioni nel modello di analisi. Successivamente le scale sono state importate anche nel modello strutturale così da potervi inserire l’armatura. Come proposto da **Gomes et al., (2022)**, per la computazione delle scale nel modello di analisi, si potrebbero inserire delle solette piene inclinate in calcestruzzo. Questo tipo di soluzione comunque richiederebbe un successivo inserimento manuale dell’armatura corretta. Il modello è stato completato con l’inserimento dei balconi su ogni piano, con l’elemento strutturale pavimento in calcestruzzo gettato in opera da 200mm (Figura 3.71).



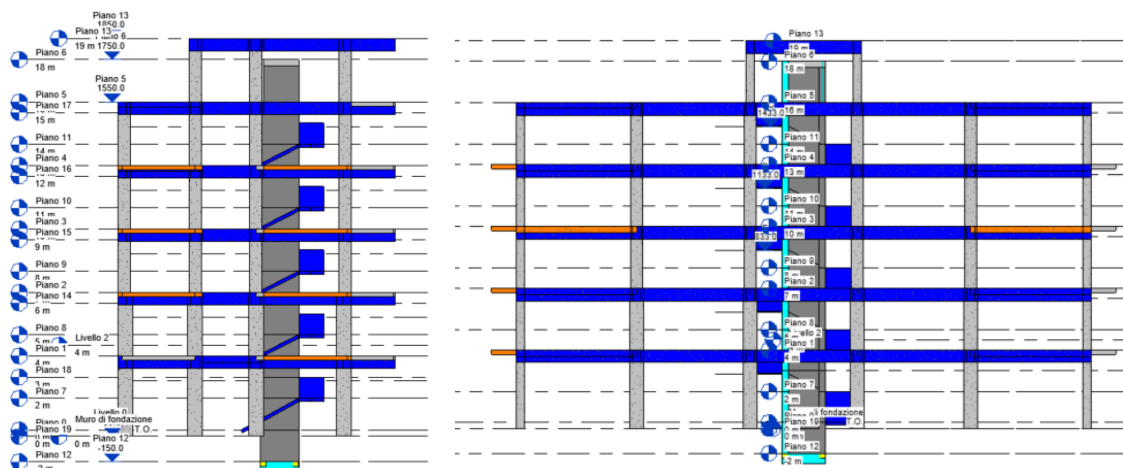


**Figura 3.71 – Vista 3D della struttura modellata su Revit, completa di balconi e scale.**

La vista sovrapposta del modello strutturale creato su Revit con quella del modello strutturale IFC di Jasp, si ritiene molto utile per una verifica di congruenza geometria tra i due modelli, poiché consente di individuare dei possibili errori di modellazione (Figure 3.72-3.73).

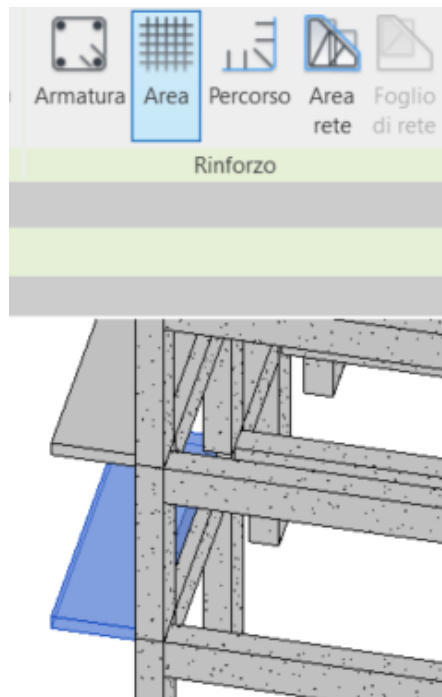


**Figura 3.72 – Vista 3D sovrapposizione modello IFC Jasp – modello Revit.**

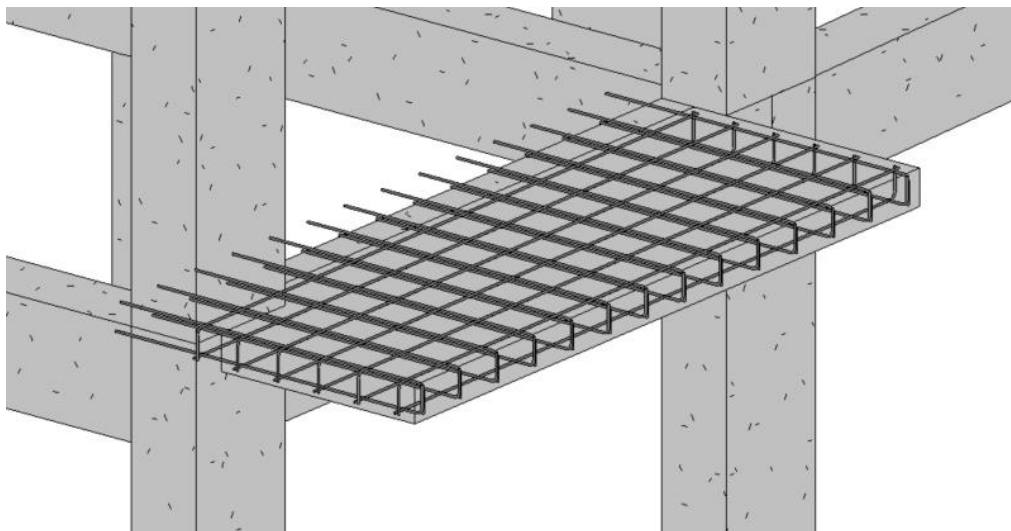


**Figura 3.73 – Viste laterali sovrapposizione modello IFC Jasp – modello Revit.**

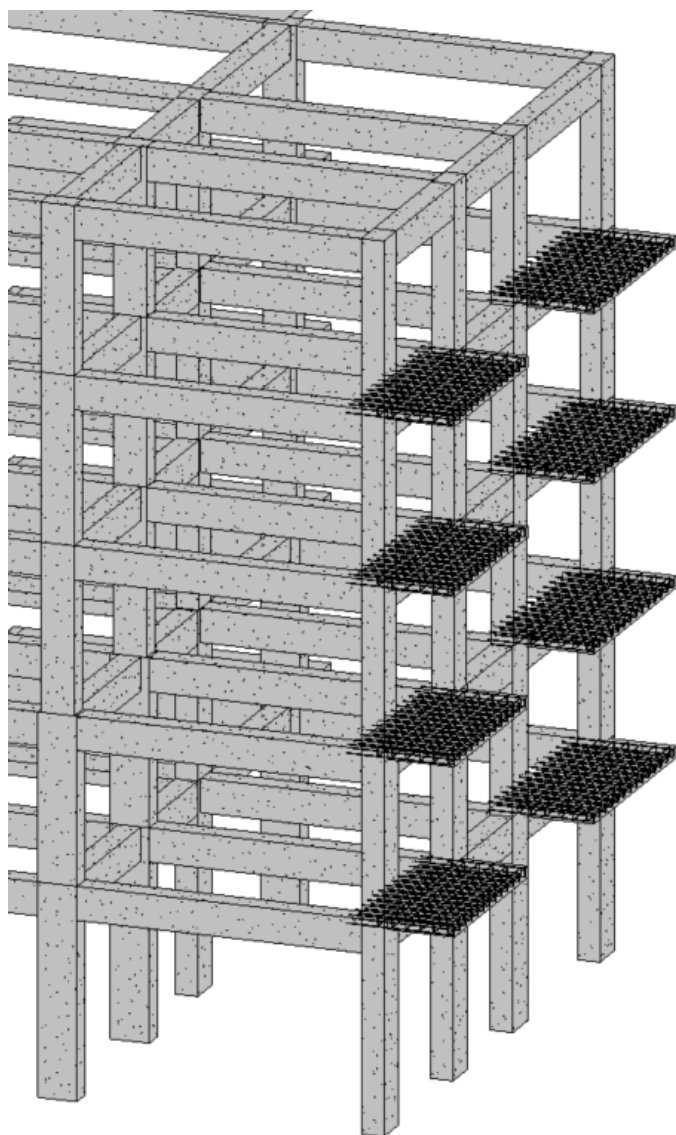
Terminato il modello strutturale è stato possibile procedere con l'armatura manuale dei balconi. Sono stati considerati i balconi laterali con sbalzo di 120 cm, in cui si ha un'altezza di 20 cm, un copriferro di 3 cm e di conseguenza un'altezza utile di 17 cm. La percentuale di armatura prevista è dello 0,0004. I carichi a cui è sottoposto il balcone sono un carico permanente di  $500 \text{ kg/m}^2$  e un carico  $Q$  variabile è di  $400 \text{ kg/m}^2$ . Il peso proprio della struttura è di  $500 \text{ kg/m}^2$ ; quindi, di avrà un carico permanente di  $G$  di  $1000 \text{ kg/m}^2$ . Con queste azioni di calcolo è possibile calcolare il carico lineare  $q = 1,3 \cdot G + 1,5 \cdot Q = 1900 \text{ kg/m}$ . A partire da questo carico è stato possibile calcolare un momento  $M_{sd} = 1368 \text{ kgm}$  e un taglio  $T_{sd} = 2280 \text{ kg}$ , per le armature è stata individuata un'area minima di calcolo  $A_{min} = 2,28 \text{ cm}^2$ . Si è scelto di armare con  $3\Phi 12 \text{ ml} = 3,39 \text{ cm}^2$ , sia per la zona tesa che per la zona compressa. Inoltre, vengono aggiunti dei ferri  $\Phi 10$  di ripartizione ogni 25 cm ed è prevista una lunghezza di ancoraggio delle barre pari a  $40\Phi$ . Terminato il calcolo dei ferri è stato possibile procedere alla modellazione dell'armatura dei balconi. Dopo aver selezionato l'elemento strutturale da armare si apre un menu specifico per poter comporre l'armatura (Figura 3.74). Cliccando sul comando armatura è possibile scegliere il tipo profilo dei ferri da quelli disponibili, in alternativa è possibile creare manualmente il profilo. Dopo aver scelto il profilo, impostato il materiale e il diametro è possibile posizionare l'armatura sull'elemento. Il posizionamento è di tipo semiautomatico e sono anche disponibili dei comandi per il posizionamento multiplo delle armature. Terminata la modellazione dell'armatura di un balcone (Figura 3.75) viene selezionata la stessa e copiata sugli elementi simili (Figura 3.76).



**Figura 3.74 – Comandi di Revit per il posizionamento manuale dell'armatura.**



**Figura 3.75 – Inserimento manuale dell'armatura di un singolo balcone con Revit 2021.**



**Figura 3.76 – Inserimento manuale dell’armatura su tutti i balconi laterali della struttura.**

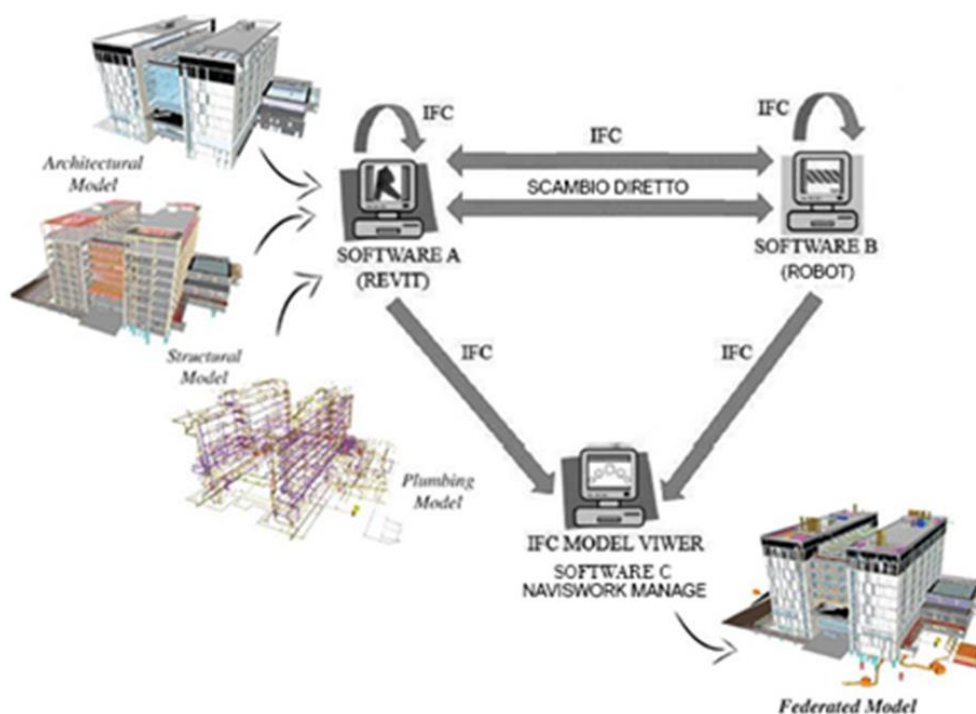
#### **- Interoperabilità Revit-Robot**

Su Revit 2021 è possibile abilitare la generazione automatica del rispettivo *modello analitico* dei diversi elementi strutturali che vengono inseriti. Inoltre, con gli appositi comandi della scheda *analizza* (Figura 3.77) è pure possibile inserire i vincoli, i carichi e le combinazioni di carico, ed inoltre, è possibile effettuare verifiche di congruenza dello stesso modello generato.



**Figura 3.77 – Comandi della scheda analizza di Revit 2021.**

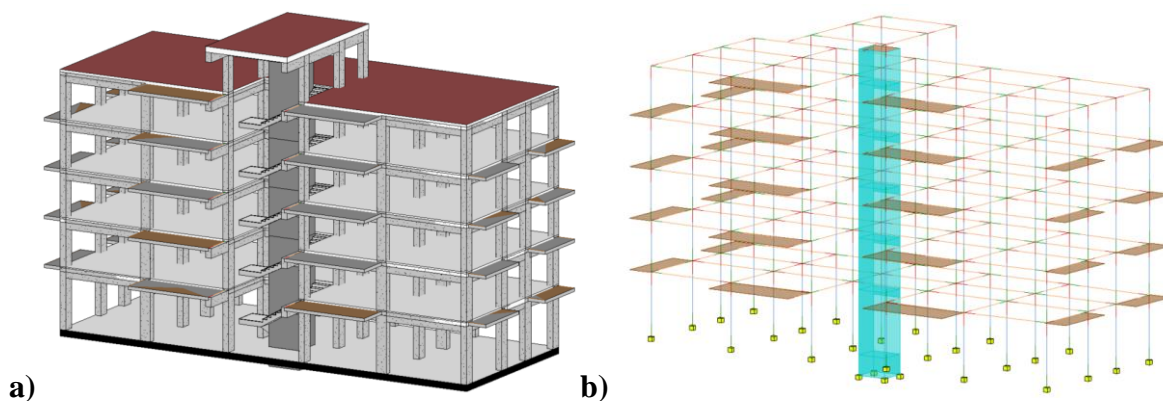
L'utilizzo di Revit per la costruzione del modello strutturale consente inoltre il passaggio diretto delle informazioni al software Robot Structural Analysis, sviluppato anche da Autodesk. Rispetto al workflow utilizzato per l'analisi che è stata proposta con Jasp, con l'utilizzo di Robot il flusso delle informazioni sarebbe sicuramente più lineare e si avrebbero meno limitazioni per quanto riguarda i formati di interscambio dei dati ai fini dell'analisi strutturale (Figura 3.78). In questo caso, nel workflow ipotizzato, l'uso del software Robot sarebbe limitato alla sola analisi strutturale e al calcolo delle armature, avendo anche a disposizione delle funzioni per la modifica delle stesse.



**Figura 3.78 – Possibile workflow di trasmissione dati con l'utilizzo del software Robot, relativo al caso studio proposto (workflow modificato - fonte di partenza Muller, et al., 2017).**

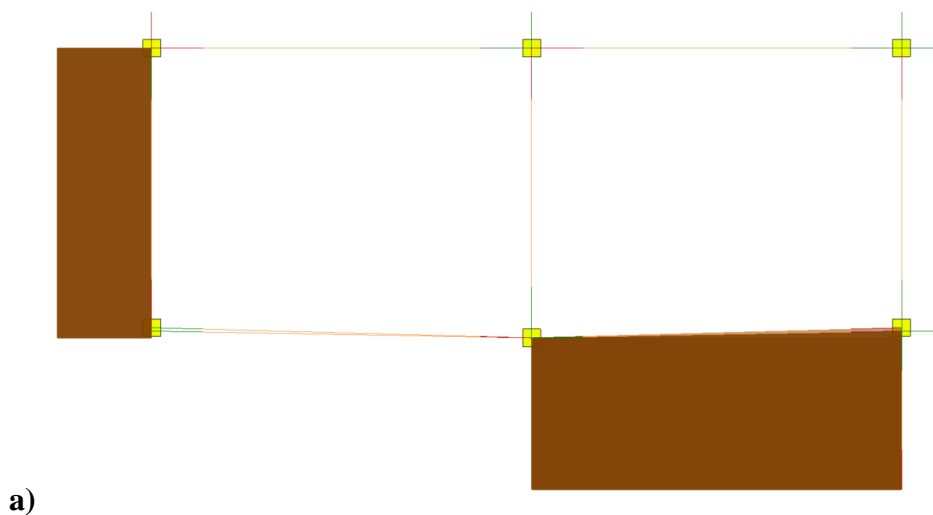
Il modello strutturale implementato su Revit, come già anticipato, presenta però delle limitazioni. Il modello analitico generato in automatico da questo software non contiene informazioni riguardo i solai e le scale, nonostante questi siano presenti all'interno del rispettivo modello strutturale (Figura 3.79).

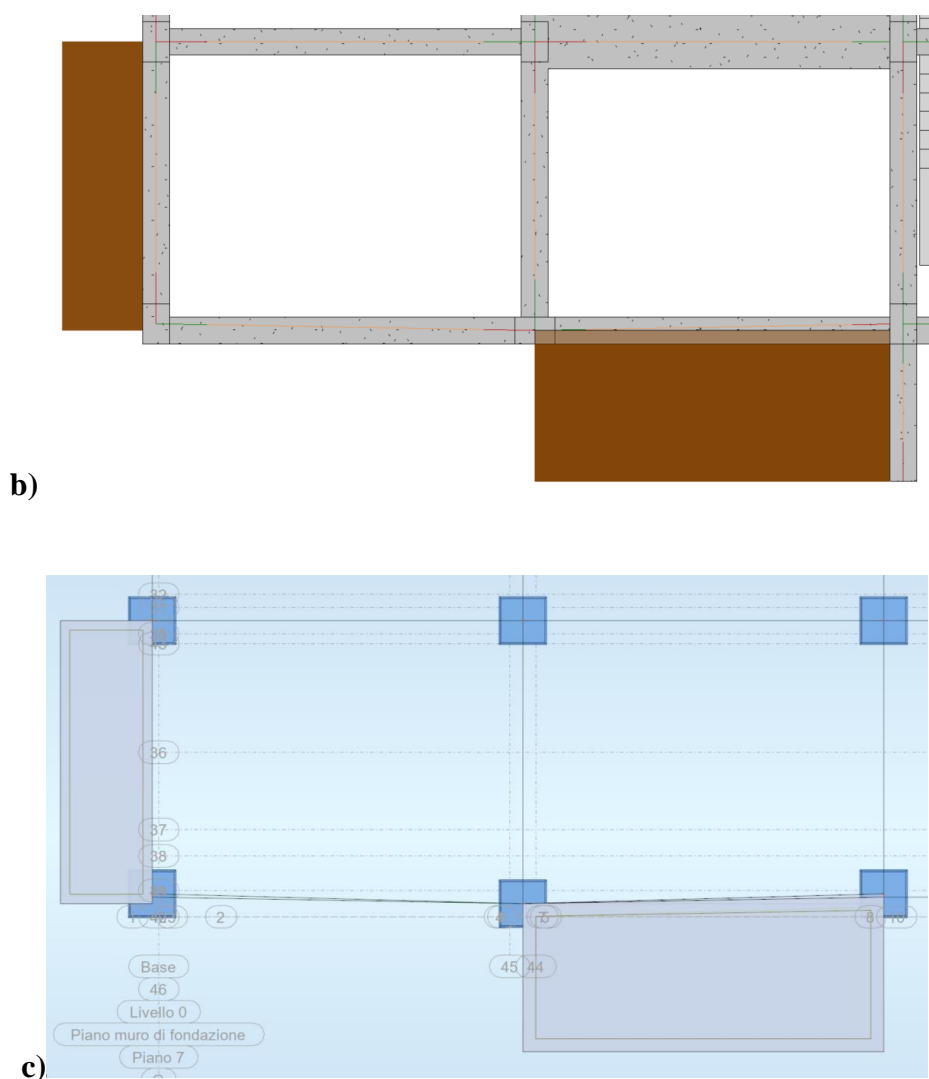




**Figura 3.79 – a) Modello strutturale creato con Revit 2021; b) Modello analitico generato in modo automatico da Revit 2021, con l’aggiunta degli incastri alla base.**

Ulteriori incongruenze rilevate nel modello analitico generato in modo automatico, a conferma di quanto riscontrato da **Gomes et al., (2022)**, si riscontrano nella non ortogonalità degli assi del modello analitico (Figura 3.80a), in quanto il software riconosce in modo automatico come nodi i punti centrali degli elementi strutturali (Figura 3.80b). Tali incongruenze, operando in situazioni progettuali complesse tipiche delle applicazioni BIM, conducono ad ottenere dei modelli di analisi completamente errati i quali, se importati direttamente sul software di analisi (Figura 3.80c) possono portare a gravi errori nella progettazione dei componenti strutturali.



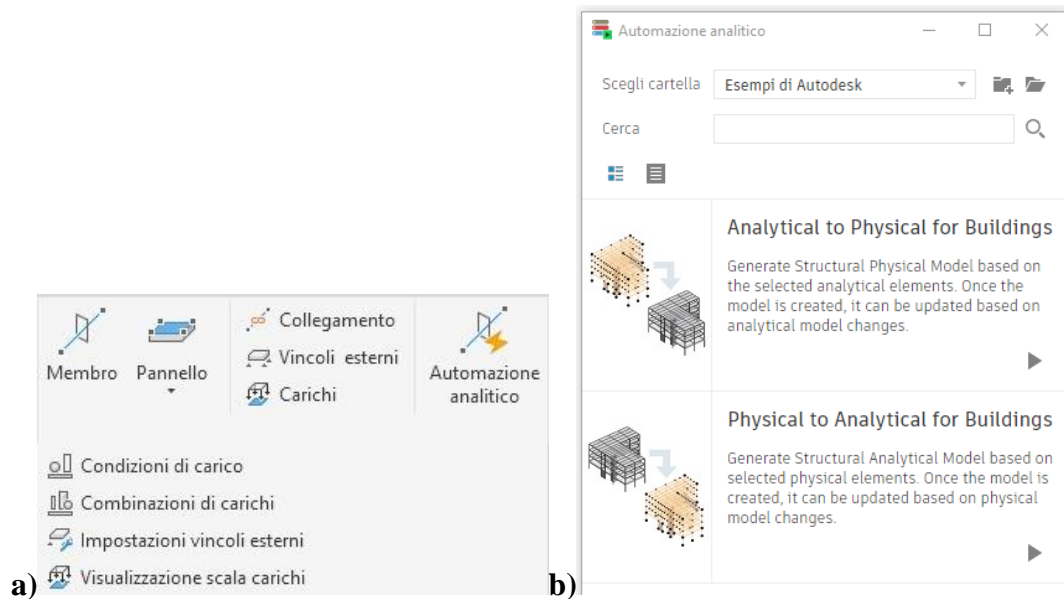


**Figura 3.80 – Evidenze sugli errori di non ortogonalità degli assi del modello di analisi: a) modello analitico generato in automatico da Revit 2021; b) modello strutturale implementato su Revit 2021; c) modello di analisi importato su Robot 2021.**

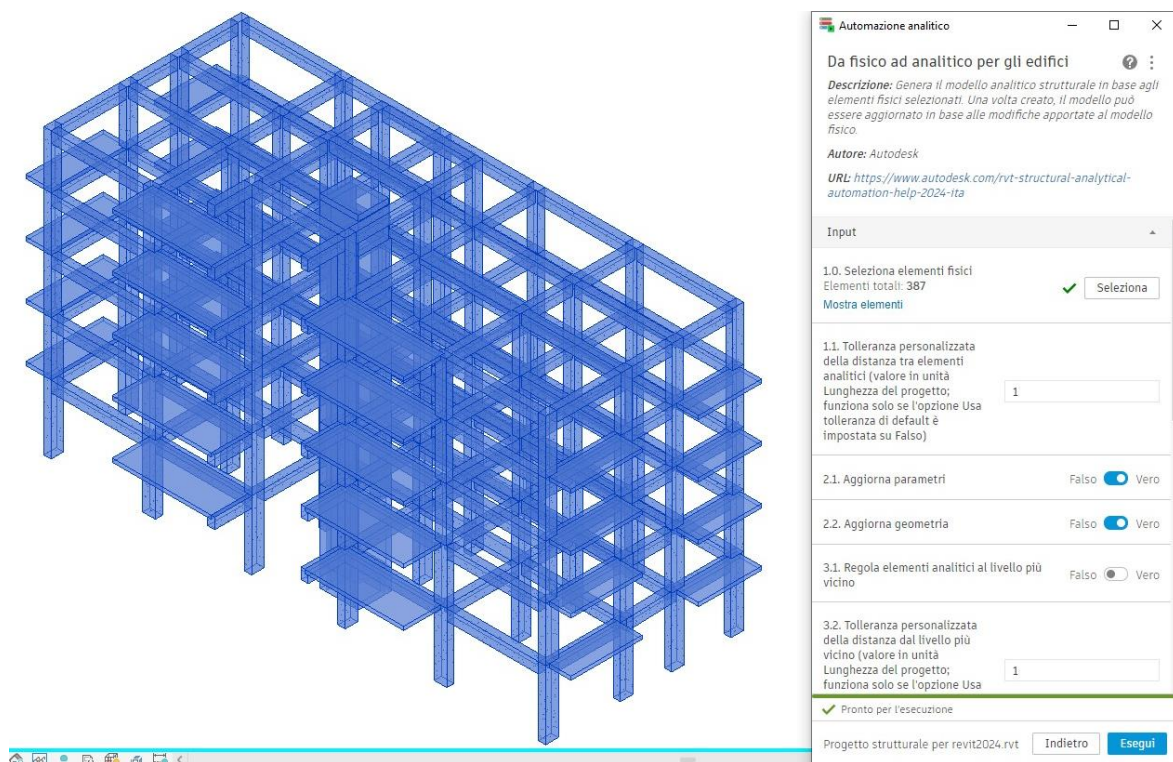
Nella versione 2021 del software Revit, sono disponibili alcuni comandi che consentono di apportare correzioni al modello analitico, prima del suo trasferimento al software di analisi. Il workflow di generazione automatica e correzione del modello, però, operando con modelli complessi potrebbe indurre il progettista alla perdita del controllo del modello di analisi. Inoltre, con ogni modifica degli elementi del modello strutturale si ha la necessità di effettuare un'ulteriore operazione di modifica o di controllo dell'intero modello di analisi.

Con la versione 2024 di Revit, sono state apportate diverse modifiche al software, con riferimento a quest'ultimo aspetto. Il modello di analisi non viene più generato in automatico con l'inserimento dell'elemento stesso, ma è stato introdotto un apposito comando di automazione (Figura 3.81a). In particolare, il comando *automazione analitico*

consente di generare un modello di analisi partendo dal modello strutturale e viceversa (Figura 3.81b). La procedura di generazione del modello di analisi, adesso, consente di inserire degli input di interpretazione per la conversione delle informazioni (Figura 3.82).



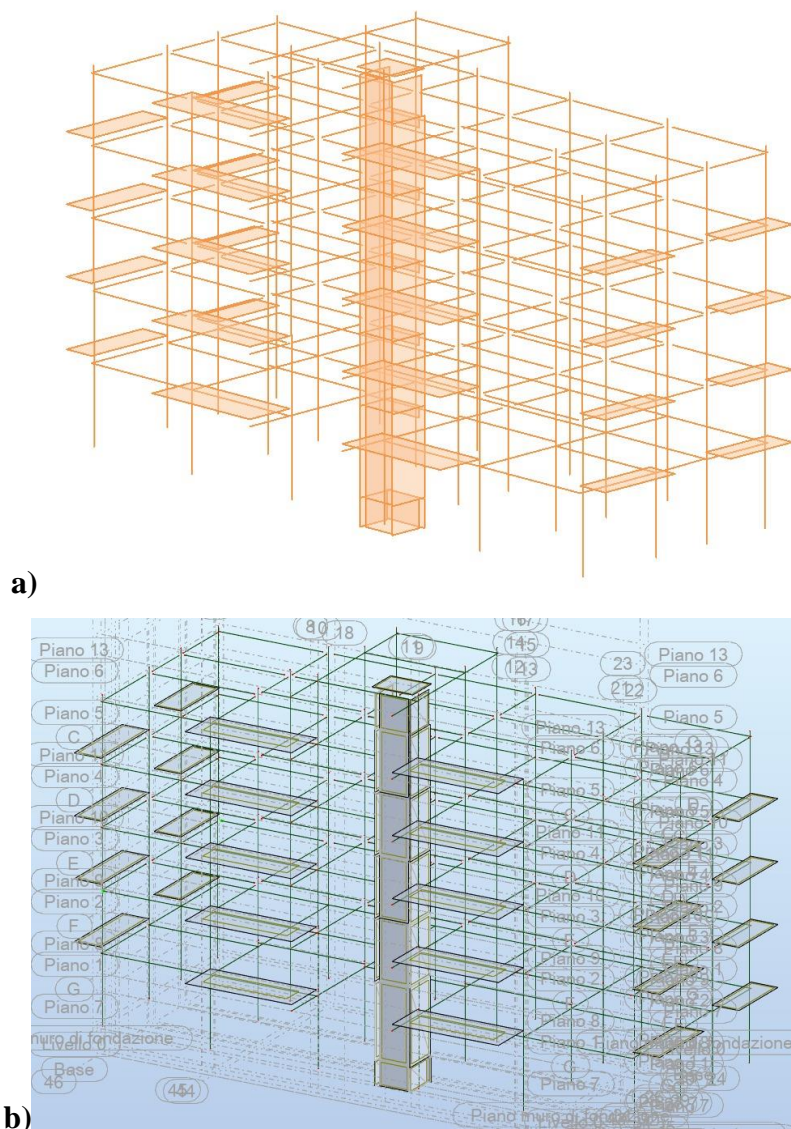
**Figura 3.81 – a) Barra dei comandi per il modello di analisi strutturale su Revit 2024; c) Interfaccia automazione modello analitico.**



**Figura 3.82 – Interfaccia di definizione degli input per la generazione del modello di analisi.**



Eseguendo delle prove di conversione, tuttavia, non sono stati raggiunti risultati soddisfacenti (Figura 3.83a). Il modello di analisi creato con questa procedura ha presentato numerose sconnessioni dei nodi, che sono state anche rilevate nel passaggio del file sul software Robot (Figura 3.83b)



**Figura 3.83 – a) Modello di analisi generato su Revit 2024, con il comando automazione analitico;  
b) Modello di analisi importato su Robot 2024.**

Così come è stato osservato, esistono ancora delle problematiche sotto l'aspetto della conversione automatica dei dati tra il modello strutturale e il rispettivo modello di analisi. Questo aspetto è stato sicuramente preso in considerazione già dagli sviluppatori software, poichè nella versione 2024 di Revit è stato predisposto un comando che permette di creare il modello di analisi in modo manuale (Figura 3.81a, comandi *membro* e *pannello*). Il metodo di generazione manuale presenta comunque molte facilitazioni, in quanto

l'inserimento avviene sempre a partire dai riferimenti dei singoli elementi strutturali, pur lasciando totalmente l'interpretazione del modello di analisi al progettista. Si può dunque affermare che la metodologia di lavoro esposta snellisce comunque il tradizionale flusso di lavoro, nonostante non risulti fluida e non sia esente da alcune problematiche.

Nell'utilizzo degli strumenti di automazione risulta comunque necessaria una modellazione consapevole, che preveda l'applicazione di una serie di accorgimenti manuali al modello generato da parte del progettista. In seguito ad ogni trasferimento di informazioni è comunque necessario fare molta attenzione agli errori e agli avvisi che si presentano, cercando di porre rimedio dove possibile. È inoltre necessario effettuare un controllo sistematico delle informazioni effettivamente trasferite al software di calcolo considerando la geometria, i vincoli, i carichi ecc.

Nonostante la costruzione del modello strutturale implementato su Revit offra la piena interoperabilità con il rispettivo modello architettonico realizzato con lo stesso software, ancora oggi, non si può fare a meno di rilevare che esiste un gap informativo con il software di analisi strutturale Robot, appartenente alla stessa software house.

Partendo da queste ultime constatazioni, l'interoperabilità nel flusso BIM si può distinguere in:

- *interoperabilità tra il modello architettonico e quello strutturale*, la quale presenta già ottimi risultati nello scambio informativo;
- *interoperabilità tra il modello strutturale e il modello di analisi*, che ad oggi ancora presenta delle limitazioni, legate soprattutto all'interpretazione geometrica automatizzata del modello strutturale per la generazione del rispettivo modello di analisi.

### **3.4 Dal modello strutturale al modello architettonico**

Definita la parte strutturale dell'edificio, la stessa è stata reimportata nel file Revit creato inizialmente per la costruzione del modello architettonico dello stesso. Il trasferimento delle informazioni dal modello strutturale di Revit a quello architettonico non ha presentato nessun tipo di problema. Per quanto riguarda l'interpretazione delle informazioni provenienti dal progetto strutturale IFC di Jasp, nella versione 2021 di Revit si sono perse le informazioni geometriche relative ai balconi, ma con la versione 2024 di Revit questa perdita di informazioni non viene più riscontrata (Figura 3.38).

La costruzione del modello architettonico è dalle informazioni del modello strutturale e dall'ipotesi di piano tipo fatta inizialmente (Figura 3.7).

Il software Revit sicuramente si presta bene per la progettazione architettonica degli edifici secondo la metodologia BIM, che prevede una modellazione ad oggetti. La progettazione dell'edificio è stata fatta ad un livello esecutivo, con un livello di sviluppo degli oggetti assimilabile al LOD D. Solo in alcuni elementi, come per esempio i solai, non si è raggiunto tale livello di dettaglio nello sviluppo degli stessi, ma i cui limiti e soluzioni sono state affrontate nel paragrafo 3.3 di questo testo.

La prima fase per la costruzione del modello è stata quella dell'inserimento dei solai architettonici, avendo l'accortezza di considerare gli spessori del massetto e della pavimentazione per l'inserimento ad una quota corretta, rispetto il livello strutturale di riferimento. Per l'inserimento dei solai, partendo dalle informazioni geometriche del modello strutturale, è stato necessario creare le rispettive famiglie architettoniche, settando gli opportuni parametri della stessa (Figura 3.84).

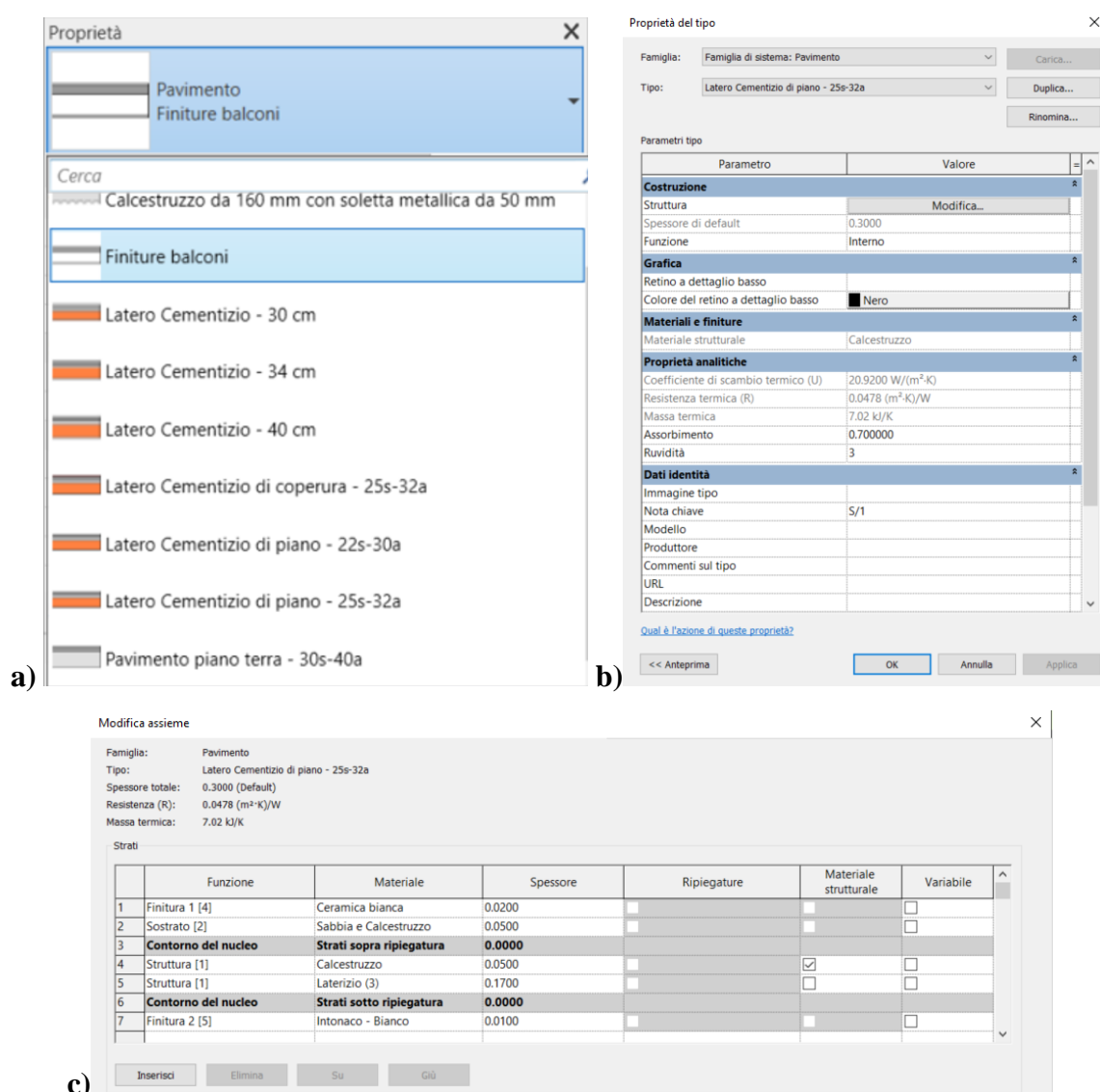
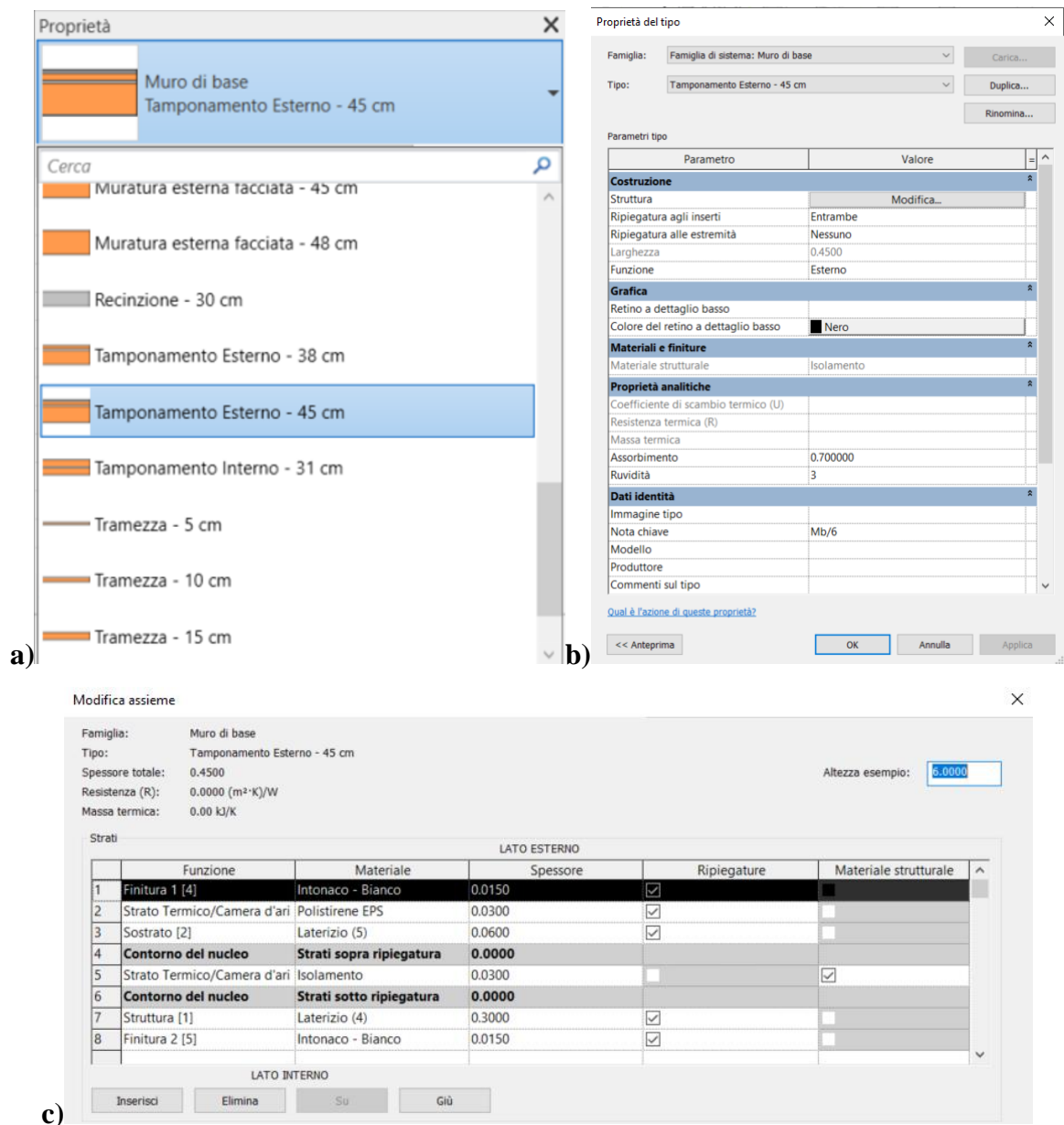


Figura 3.84 – a) Elenco di alcune tipologie di pavimenti architettonici create; b) Parametri del tipo della pavimentazione interna; c) Stratigrafia della pavimentazione interna.

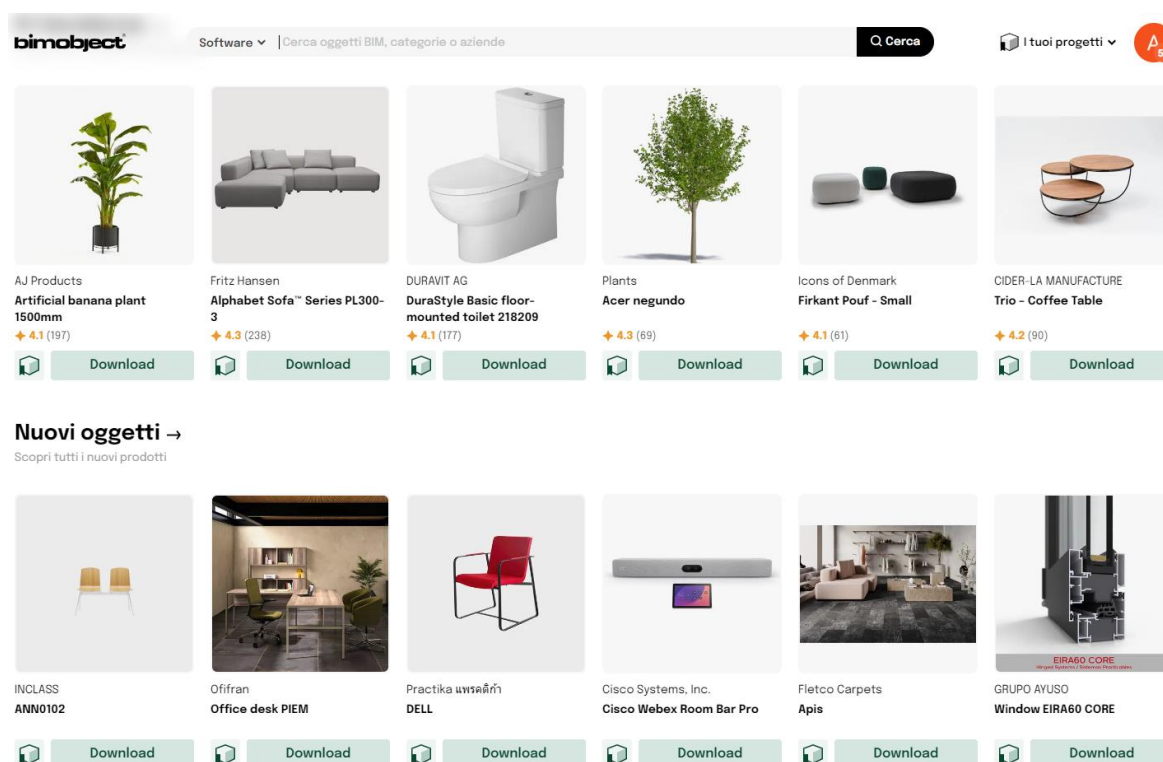
In modo analogo sono stati anche creati i muri di tamponamento e i muri esterni che sono stati previsti per il modello (Figura 3.85). La scelta delle dimensioni dei tamponamenti è stata fatta partendo dalle dimensioni dei pilastri del file strutturale importato.



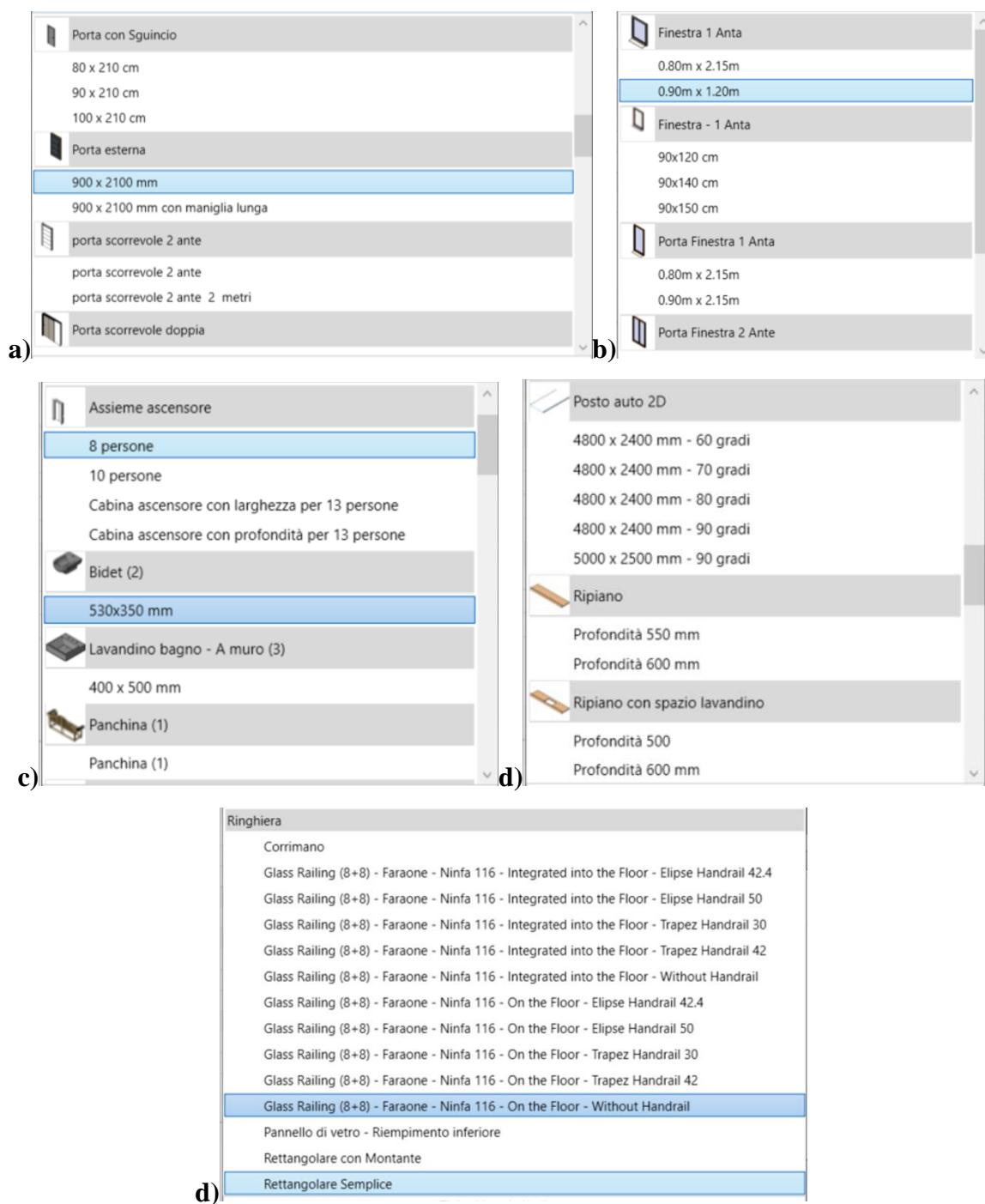
**Figura 3.85 - a) Elenco di alcune tipologie di muri architettonici create; b) Parametri del tipo della muratura di tamponamento; c) Stratigrafia della muratura di tamponamento.**

La modellazione architettonica dell’edificio ha previsto anche l’inserimento di tutte le famiglie degli elementi costituenti lo stesso, come: le porte, gli infissi, le ringhiere, ecc. I modelli parametrici di diversi elementi sono reperibili in apposite piattaforme o possono essere forniti direttamente dai produttori dell’elemento stesso. Il software consente comunque di creare i singoli oggetti parametrici, qualora di questo non sia reperibile il modello, o se si tratta di una un elemento speciale non esistente in commercio.

L'approccio BIM orientato all'oggetto, infatti, ha rivoluzionato non solo i metodi di progettazione, ma ha anche portato innovazione nei settori di produzione dei prodotti per l'edilizia, di forniture, e anche dei prodotti per l'impiantistica. Molte aziende operanti nel settore di queste forniture, si preoccupano infatti di fornire insieme ai loro prodotti il rispettivo oggetto parametrico (il cosiddetto *digital twin*) da poter inserire all'interno dei modelli BIM. Tali oggetti in genere contengono anche tutte le informazioni necessarie per eventuali analisi energetiche, strutturali, impiantistiche, ecc. Esistono anche piattaforme web che raccolgono, catalogano e rendono disponibili i diversi modelli parametrici. Tra quelle disponibili è stata consultata *bimobject* (<https://www.bimobject.com/it>) (Figura 3.86). Si riporta a seguire una panoramica di alcuni degli elementi utilizzati per il completamento del modello architettonico (Figura 3.87). Dopo aver caricato le famiglie di oggetti sul file di progetto di Revit (*inserisci>carica famiglia*), il posizionamento degli stessi oggetti si esegue con l'ausilio dei comandi presenti nella sezione architettonica *costruisci* (comandi: *Porta*, *Finestra* o *Componente*), le vetrate dell'edificio, invece, sono state create con gli appositi comandi di *facciata continua* (Figura 3.88).



**Figura 3.86 – Esempio di oggetti parametrici che è possibile scaricare dalla piattaforma web bimobject (<https://www.bimobject.com/it>).**



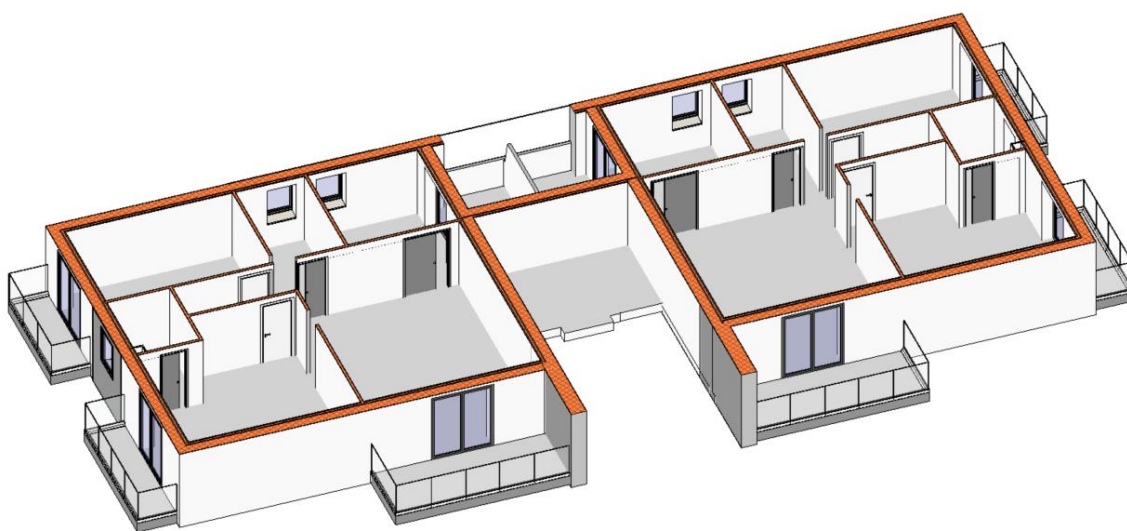
**Figura 3.87 – Elenco di alcuni oggetti parametrici utilizzati per la costruzione del modello architettonico dell’edificio: a) porte; b) finestre; c) componenti; d) componenti; d) ringhiere.**



**Figura 3.88 – Comandi presenti nella scheda costruisci di Revit 2021.**

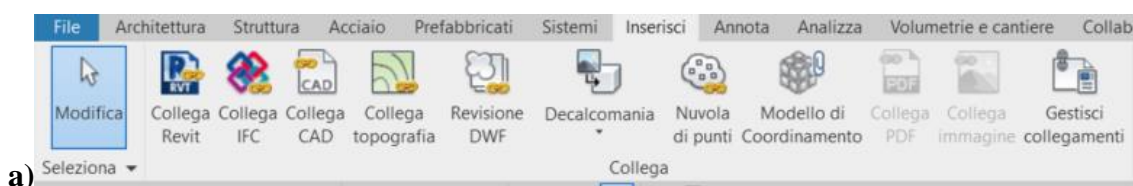


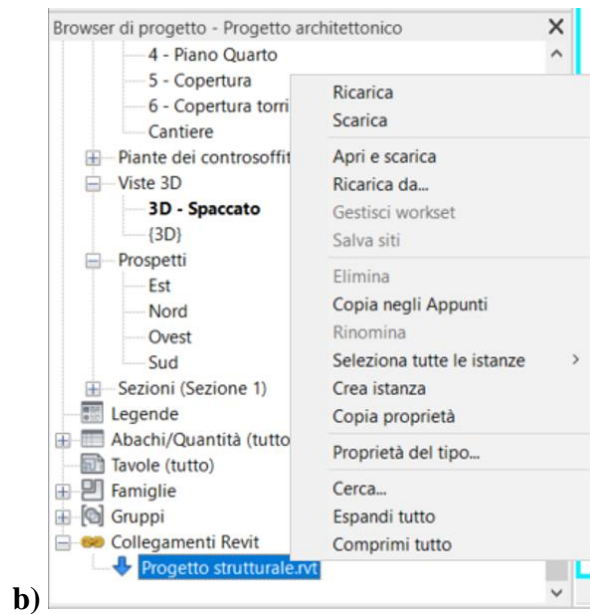
Inizialmente la modellazione architettonica dell'edificio è stata eseguita considerando un solo piano tipo (Figura 3.89), terminata la modellazione del piano sono stati utilizzati i comandi *copia negli appunti* e *incolla ai livelli selezionati*, per copiare gli stessi elementi sugli altri piani. Il modello è stato poi successivamente completato con l'inserimento degli elementi di copertura, e di tutte le finiture esterne come, ad esempio, delle fasce di intonaco aggiuntive, i marciapiedi e parcheggi (Figure 3.92 e 3.93).



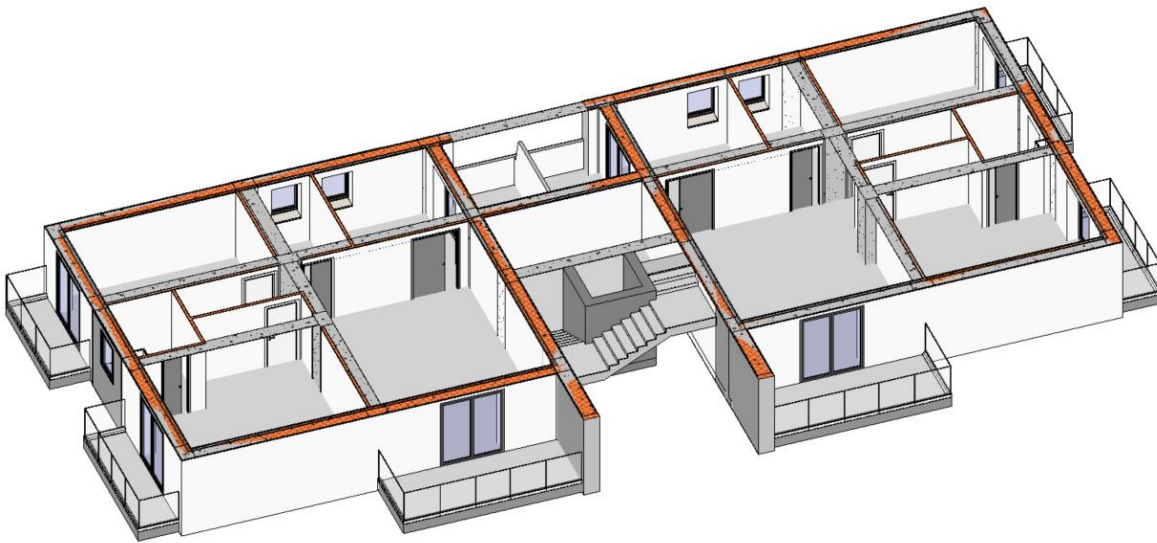
**Figura 3.89 – Spaccato piano tipo del modello architettonico.**

Come è possibile vedere nello spaccato architettonico di Figura 3.89, in questo modello non è presente alcun elemento strutturale. Gli elementi strutturali infatti afferiscono al file strutturale e possono coesistere, senza possibilità di alcuna modifica, solamente come elemento collegato. Il modello strutturale collegato può essere visualizzato o meno all'interno del modello architettonico (comandi *scarica* e *ricarica*) (Figura 3.90). In Figura 3.91 si riporta la rappresentazione dello stesso spaccato architettonico, in cui però viene visualizzato anche il modello strutturale collegato. Questo confronto è stato proposto al fine di sottolineare il concetto della divisione tra il dominio architettonico e il dominio strutturale, nonché la loro interoperabilità nella realizzazione dei modelli BIM.





**Figura 3.90 – a) Comando “Collega Revit” della scheda Inserisci; b) Browser di progetto con l’indicazione del modello strutturale collegato.**



**Figura 3.91 - Spaccato piano tipo del modello architettonico e strutturale collegato.**





**Figura 3.92 – Vista assonometrica frontale del modello architettonico completo.**

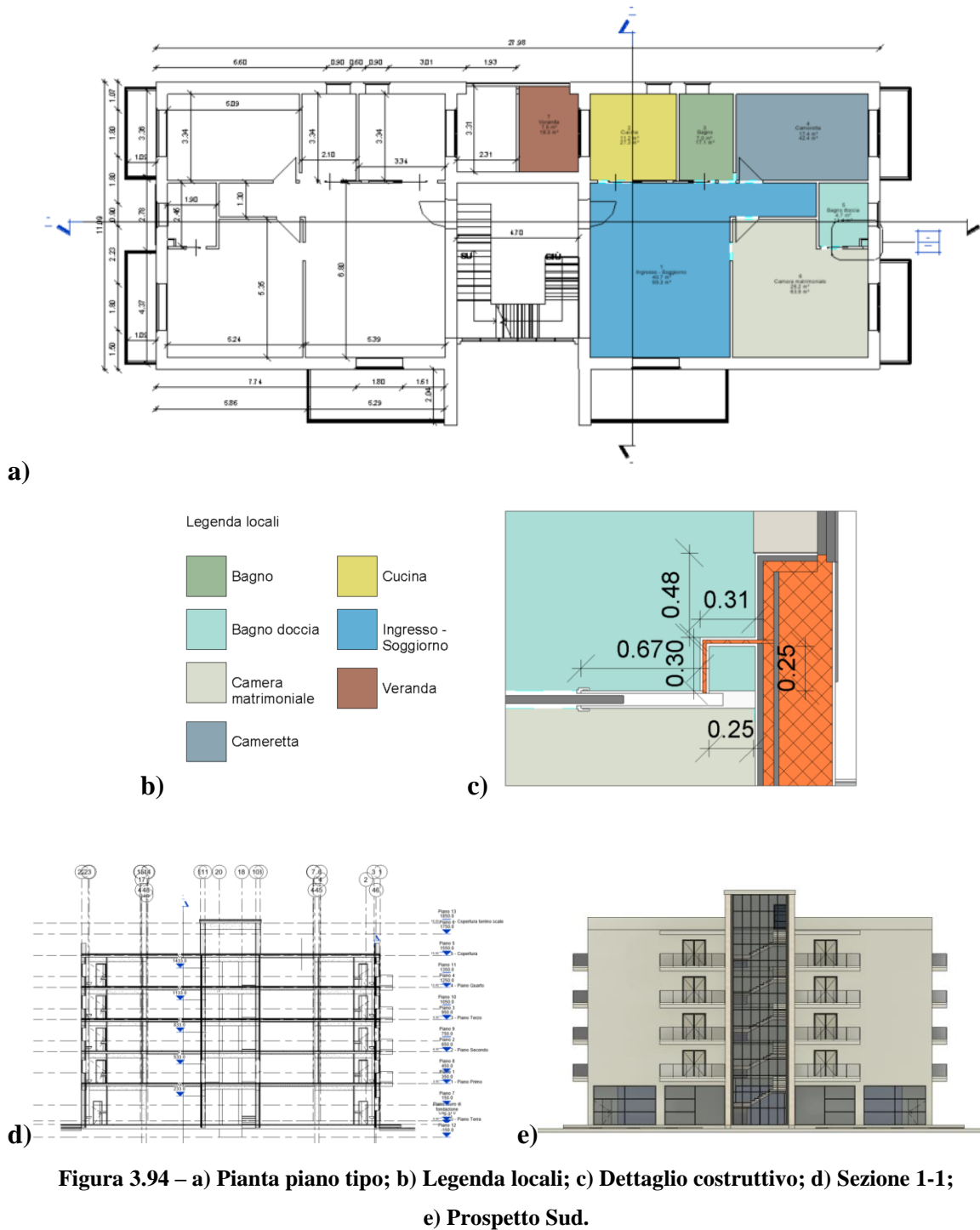


**Figura 3.93 – Vista assonometrica posteriore del modello architettonico completo.**

I vantaggi nell'utilizzo della metodologia BIM per la progettazione sono molteplici e il software di BIM Authoring Revit è sicuramente uno tra quelli più sviluppati a tal proposito. Un modello così fatto, oltre a conferire una percezione quanto più possibile fedele della realtà, è un contenitore di informazioni consultabile e aggiornabile per tutta la vita dell'opera stessa.

A partire dal modello creato con Revit è possibile creare elaborati tecnici per diversi obiettivi e livelli di dettaglio (Figura 3.94), interrogare il modello per creare abachi quantità di materiali, di superfici di qualsiasi elemento o parte di modello, del numero di elementi presenti nel modello, ecc. (Figura 3.95). Aspetto molto importante è quello che si tratta anche di un modello dinamico, e quindi tutte le informazioni presenti nelle tavole o

negli abachi creati si aggirano ad ogni modifica dello stesso. È possibile anche creare sullo stesso modello più varianti progettuali, ad esempio per la valutazione dei diversi interventi, o per mantenere archiviata la storia dell'opera edilizia ad ogni sua modifica. Tutto quello che è stato proposto è possibile prevederlo per i modelli strutturali creati su Revit.



<Abaco dei locali>			
A	B	C	D
1	Ingresso - Soggiorno	40.7 m²	99.3 m³
2	Cucina	11.2 m²	27.3 m³
3	Bagno	7.0 m²	17.1 m³
4	Cameretta	17.4 m²	42.4 m³
5	Bagno doccia	4.7 m²	11.4 m³
6	Camera matrimoniale	26.2 m²	63.9 m³
7	Veranda	7.5 m²	18.3 m³
		114.7 m²	279.8 m³

a)

<Computo dei materiali muro>		
A	B	C
Materiale: Descrizione	Materiale: Area	Materiale: Volume
Muro di base: Intonaco esterno - 1.5 cm		
Verniciatura	222.9 m²	3.3 m³
Muro di base: Muratura esterna facciata - 45 cm		
Bimattone - 12x12x25 cm	70.7 m²	29.7 m³
Verniciatura	141.3 m²	2.1 m³
Muro di base: Muratura esterna facciata - 48 cm		
Bimattone - 12x12x25 cm	139.6 m²	62.8 m³
Verniciatura	281.9 m²	4.2 m³
Muro di base: Tamponamento Esterno - 45 cm		
Bimattone - 12x12x25 cm	1161.6 m²	35.0 m³
Facciata continua 6x25x50 cm	1158.4 m²	348.0 m³
Pannello in sughero	1160.8 m²	69.9 m³
Verniciatura	1159.2 m²	34.9 m³
Muro di base: Tramezza - 5 cm		
Facciata continua 12x25x50 cm	2341.7 m²	34.8 m³
Verniciatura	16.0 m²	0.3 m³
Muro di base: Tramezza - 10 cm		
Facciata continua 12x25x50 cm	32.0 m²	0.5 m³
Verniciatura	631.6 m²	41.7 m³
	1279.2 m²	17.9 m³

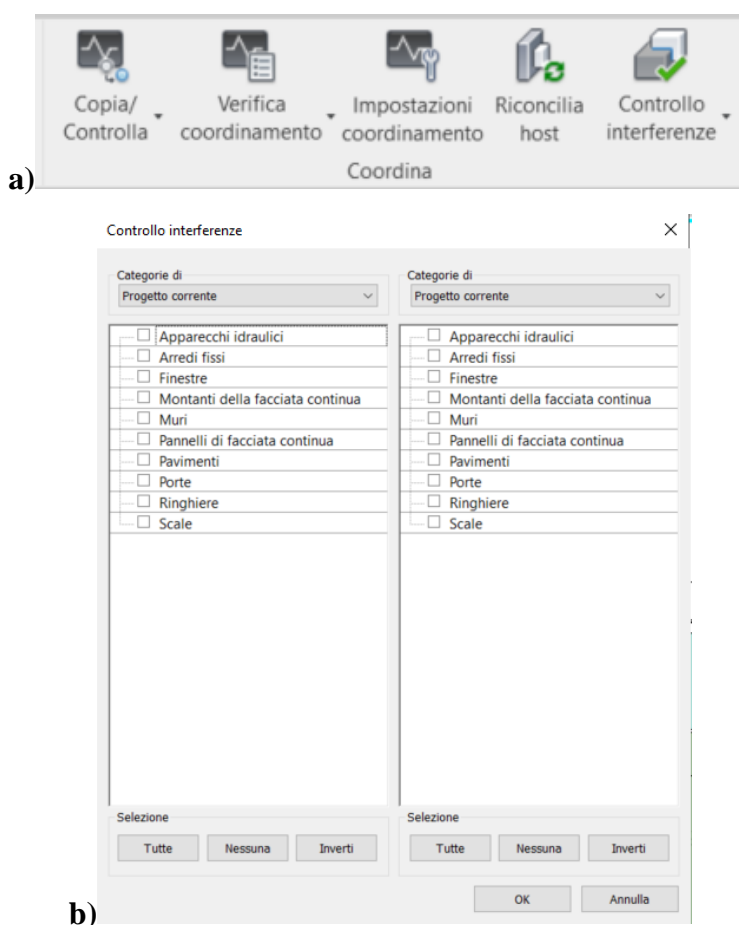
b)

**Figura 3.95 – a) Abaco superfici dei locali; b) Abaco dei materiali muro.**

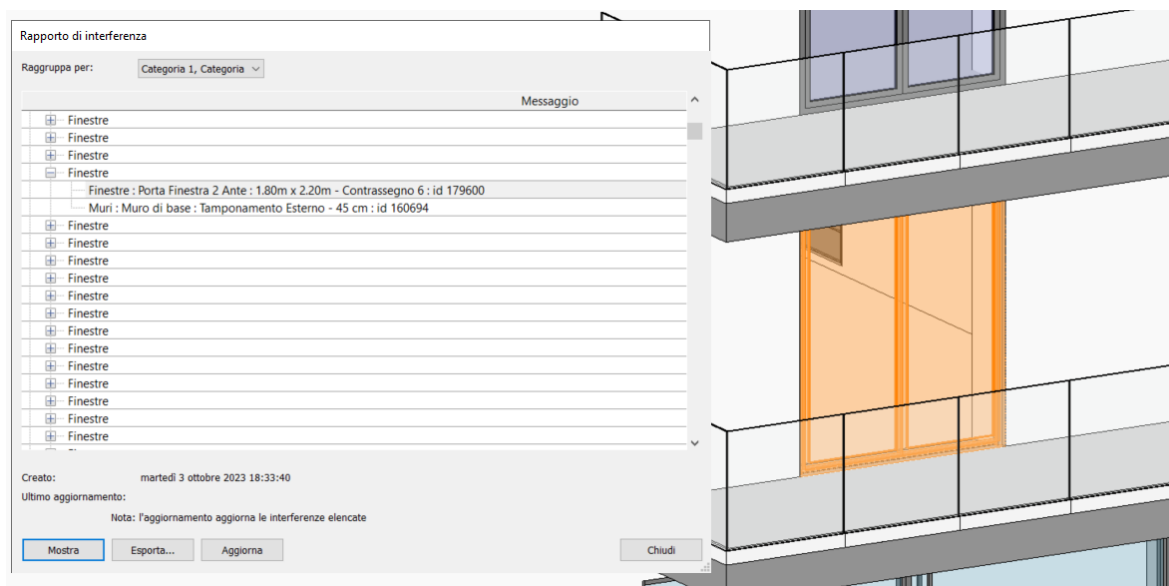
Con il software Revit, il modello BIM può essere facilmente esaminato per l'individuazione di incongruenze o errori di progettazione effettuando una *clash detection*. Il comando proposto per questa operazione si trova sotto la nella scheda (*collabora>coordina> controllo interferenze*) (Figura 3.96a). Selezionando questo si apre una finestra dove è possibile scegliere le categorie di elementi su cui fare il controllo. Il controllo può essere eseguito sia tra elementi del modello corrente, sia da elementi appartenenti a diversi modelli collegati, nativi di Revit (Figura 3.96b).

Terminato il processo di analisi, il software aprirà un'interfaccia dove è presente la lista di tutte le interferenze rilevate. Selezionandone una e utilizzando il comando mostra, il software evidenzierà la *clash* nel modello (Figura 3.97). Sarà compito del progettista, in fase preventiva, oppure di un BIM Manager in fase di controllo dei modelli, capire quale

sia l'azione correttiva più adeguata a ogni specifica *clash*. È bene fare una precisazione, in quanto le stesse interferenze sono state distinte in base alla gravità in: *hard clash*, che individua la collisione fisica tra due oggetti del modello, e *soft clash*, la quale allerta su una eccessiva vicinanza tra due oggetti che potrebbe generare problemi in fase di esecuzione/installazione o manutenzione. Fatta questa distinzione si rileva che la maggior parte delle interferenze presenti nel modello architettonico erano delle *soft clash*. L'individuazione delle *hard clash* invece è stata un fondamentale supporto per la risoluzione degli errori che erano stati fatti in fase di modellazione.



**Figura 3.96 – a) Comando per il controllo delle interferenze; b) Interfaccia per la selezione del progetto e delle categorie di elementi su cui fare il controllo.**

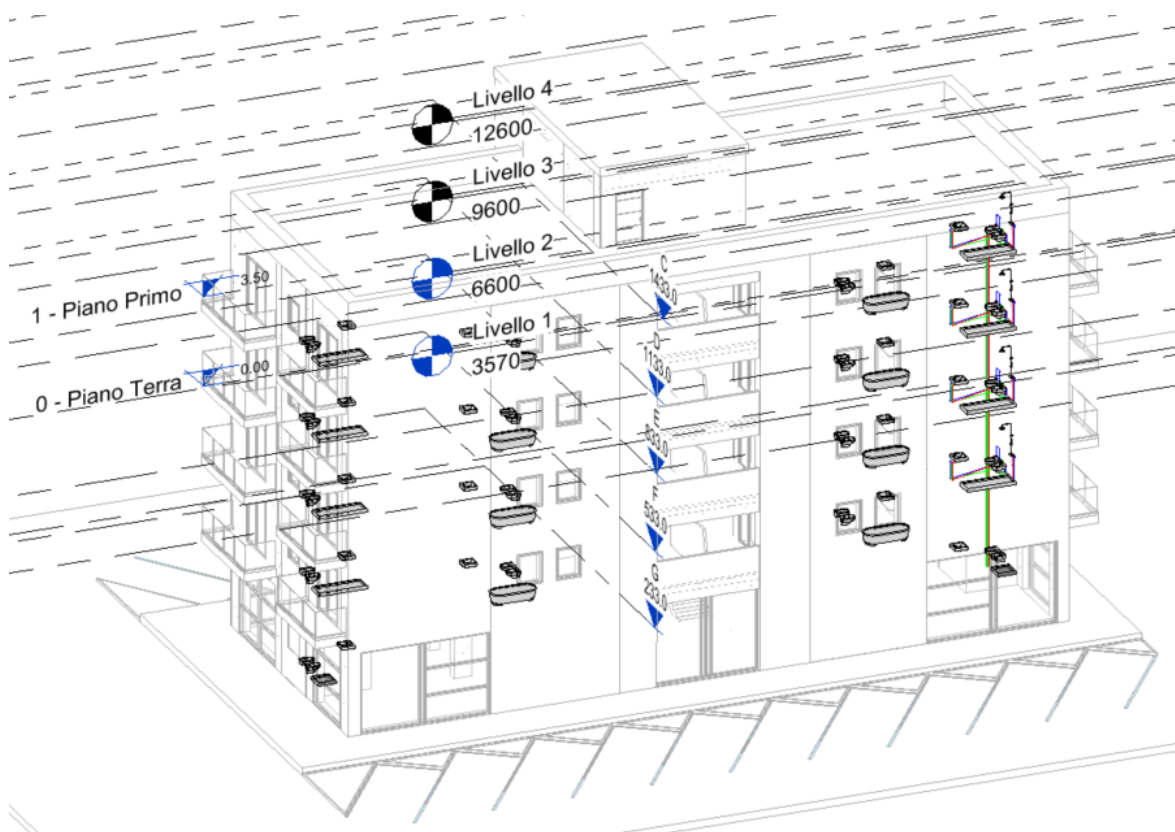


**Figura 3.97 – Rapporto delle interferenze rilevate tra gli elementi del modello architettonico.**

### 3.5 Modellazione MEP: impianto idrico-sanitario

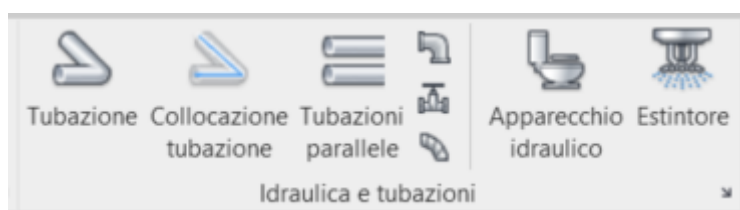
L'acronimo MEP sta ad indicare *Mechanical, Electrical and Plumbing*. La modellazione MEP, quindi, non è altro che il processo di creazione del modello 3D di un progetto impiantistico. Questo modello contiene al suo interno tutte le informazioni fisiche, tecniche e funzionali relative all'impianto, che appunto può essere meccanico, elettrico o idraulico. Nella progettazione degli impianti MEP si distinguono tre fasi principali: la modellazione, il dimensionamento e analisi e la stima dei costi dell'impianto.

In questo lavoro è stata sviluppata solamente la modellazione di una parte dell'impianto idrico dell'edificio, al fine di poter successivamente creare un modello BIM federato che includa informazioni anche del dominio MEP. La modellazione dell'impianto idrico è stata eseguita con l'ausilio del software Revit 2021. Il primo passo è stato quello creare un nuovo progetto di modello idraulico, in cui sono stati importati come collegamenti il modello architettonico e quello strutturale. Gli elementi sanitari dei bagni sono stati inseriti in una fase precedente nel modello architettonico (Figura 3.98).



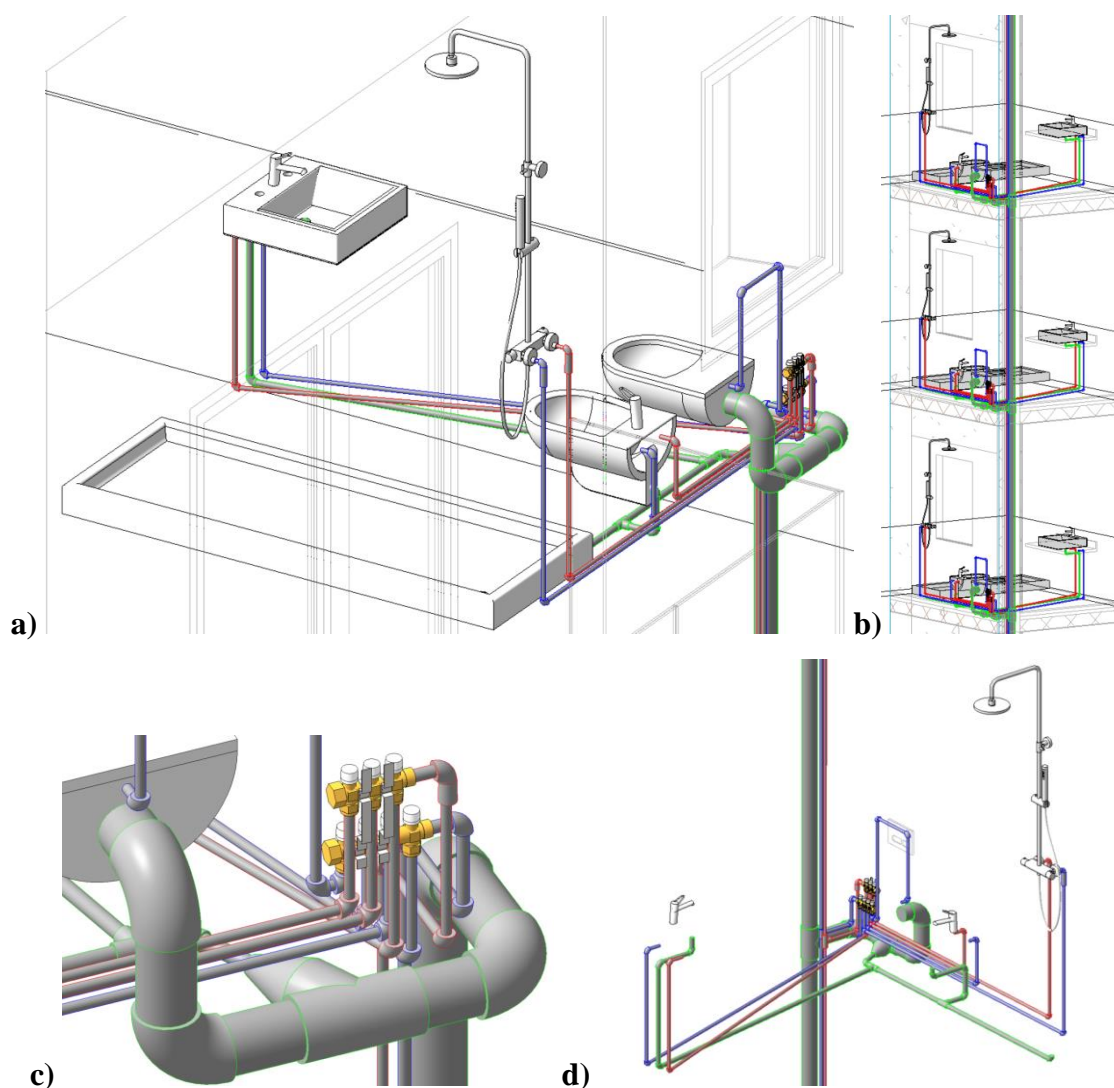
**Figura 3.98 – Modelli architettonico e strutturale collegati al modello idraulico.**

A partire da questi riferimenti è stato possibile procedere alla modellazione servendosi degli appositi comandi della scheda sistemi (Figura 3.99).



**Figura 3.99 – Gruppo comandi per la modellazione degli impianti idrici di Revit 2021.**

Trattandosi solamente di una modellazione di massima, è stata utilizzata per tutti i collegamenti una tubazione di tipo standard, parametrizzandone solamente il tipo di sistema (acqua fredda o calda sanitaria e acqua reflua). Sono stati altresì inseriti anche tutti i componenti idraulici che necessitavano per il completamento dell'impianto (Figura 3.100). Alcuni di questi elementi sono stati presi da apposite librerie, altri sono stati personalizzati modificando elementi sia importati che disponibili nel software.



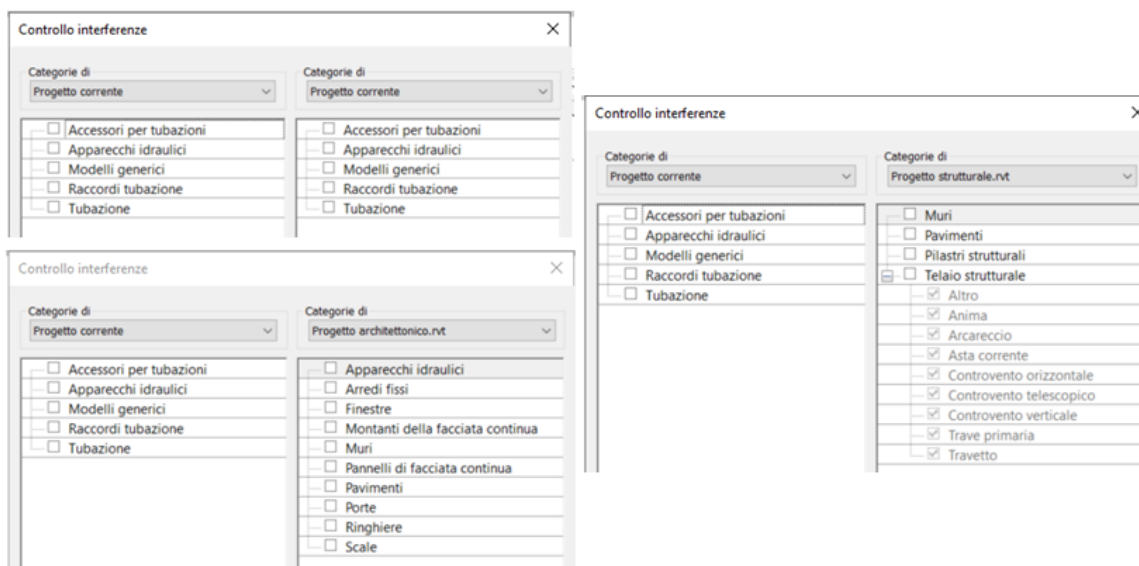
**Figura 3.100 – a) Vista 3D del progetto idraulico di un bagno; b) Vista 3D del progetto idraulico su più piani; c) Particolare delle connessioni alla centralina; d) Vista 3D solo progetto idraulico senza file collegati.**

Il software consente anche di verificare la connessione di tutte le parti dell'impianto e, per mezzo di opportuni plug-in, è anche possibile effettuare il dimensionamento e il calcolo degli impianti, nel rispetto dei parametri previsti dalle normative specifiche.

Una delle ulteriori funzioni offerte dal software Revit, anche in questo caso, è quella della *clash detection*, consentendo di avere immediata evidenza delle eventuali problematiche di interferenze tra elementi architettonici, strutturali e impiantistici, per poter così prevenire errori di progettazione. Tale controllo può essere condotto selezionando specificatamente la categoria di elementi da analizzare (Figura 3.101). Il controllo delle interferenze effettuato con Revit ha però il limite del dover avere i diversi modelli generati con il medesimo software, le *clash detection* di modelli afferenti da più software possono essere effettuate con software specifici come Navisworks.



Uno dei benefici della progettazione integrata è proprio quello di poter verificare eventuali incongruenze progettuali anche tra più discipline, ottenendo un risparmio economico, di tempo e la capacità di controllo e verifica delle scelte di progetto già dalle fasi preliminari.



**Figura 3.101 – Controllo interferenze tra il modello idraulico e le altre discipline.**

Il modello MEP generato con Revit può essere anche esportato in formato IFC in modo tale da essere interoperabile e condiviso con tutti i professionisti coinvolti nella progettazione. Sicuramente nel realizzare un progetto BIM che includa anche la parte MEP, si ha il beneficio di avere una visione immediata d'insieme del sistema edificio-impianti, con la possibilità di ridurre al minimo l'incremento di costi in fase di realizzazione. Come già visto anche per il modello architettonico e strutturale, dal modello MEP è possibile ricavare gli elaborati esecutivi e gli abachi quantità dei materiali a cui poter anche associare i costi.

### 3.6 Modello federato e controllo delle interferenze

Il modello federato BIM rappresenta l'unione di diversi modelli parametrici specialistici del progetto (modello strutturale, impiantistico, architettonico, forniture, ecc.) ovvero rappresenta il modello digitale completo dell'opera.

Questo modello integrato ha lo scopo di agevolare la condivisione delle informazioni, il coordinamento tra le discipline coinvolte, il controllo delle interferenze e le verifiche di progettazione. I diversi modelli collegati all'interno del modello federato non perdono la loro identità o integrità. Questo permette che un'eventuale modifica ad una singola

componente del modello federato non implica una modifica ad altre componenti dello stesso modello federato. La federazione tra i modelli viene gestita attraverso l'utilizzo di strumenti BIM specifici per questo scopo e che sono in grado di coordinare le diverse discipline coinvolte e di creare una base informativa comune per le parti interessate.

Lo scopo principale della creazione di un modello federato è quello di verificare e gestire eventuali problematiche, conflitti e incongruenze che emergono dal confronto e dalla sovrapposizione dei diversi modelli.

Il coordinamento di tali processi, quindi, prevede anche il controllo, la gestione e la supervisione di eventuali conflitti tra le singole parti del modello federato, rendendo necessario il coinvolgimento di specifiche figure professionali. La norma UNI 11337, nella parte relativa a tali aspetti, individua in particolare due figure gestionali, il BIM Manager e il BIM Coordinator, e una con formazione più operativa, il BIM Specialist.<sup>45</sup>

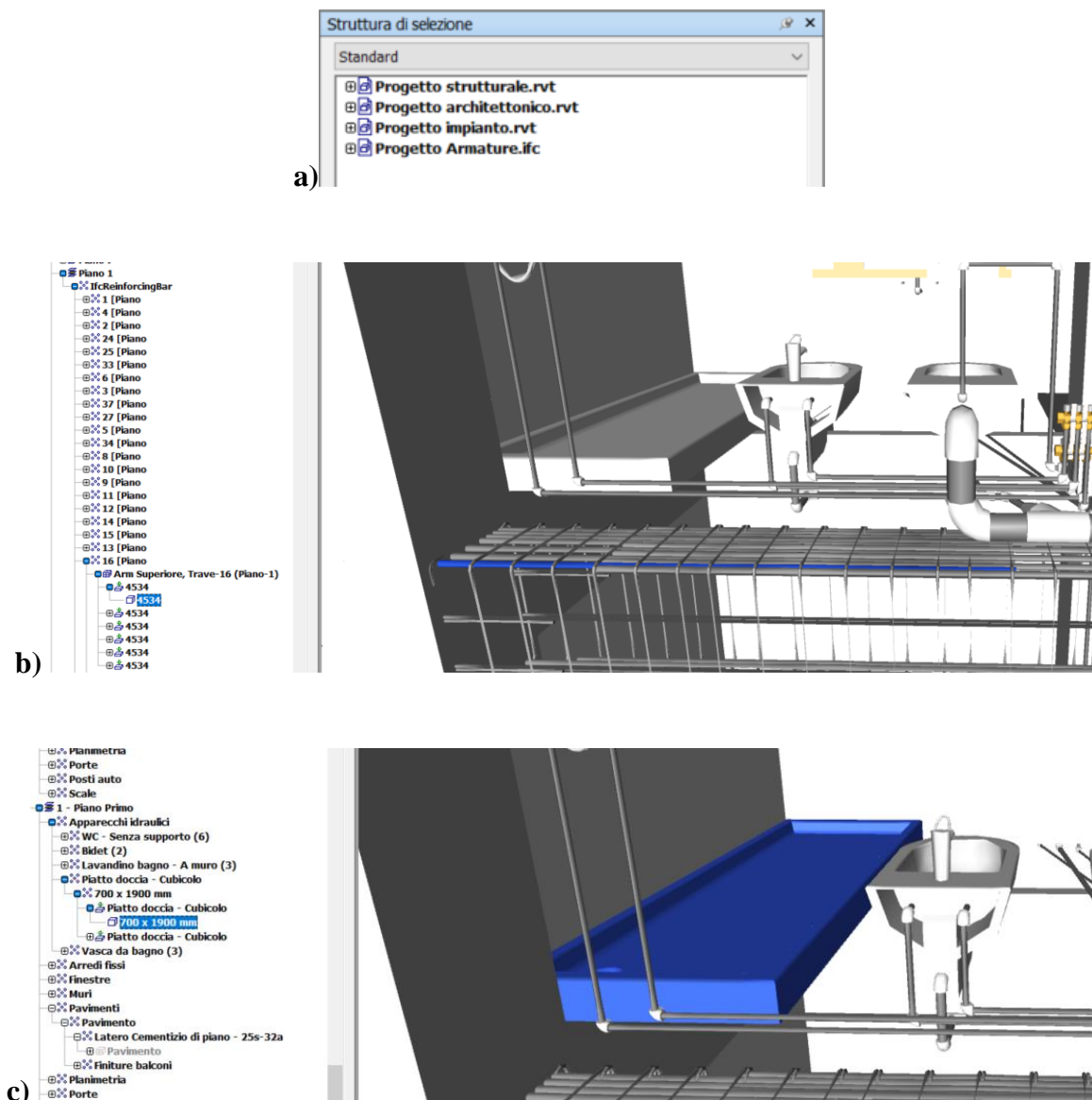
Per il caso studio proposto, il software che è stato utilizzato per creare il modello federato è Autodesk Navisworks Manage, che consente di applicare tutte le sue funzionalità sia ai modelli con file nativi di casa Autodesk, sia ai modelli in formato di interscambio IFC. potranno impostare le stesse funzionalità su formati di dati di interscambio. Le principali funzionalità di questo software sono quelle di poter effettuare la *Clash Detective*, la *TimeLiner (4D)* e la contabilizzazione. Ulteriori funzionalità sono quella di poter effettuare delle revisioni ai modelli e presentazioni attraverso render e animazioni.

La piattaforma si basa su tre differenti tipologie di files che hanno funzionalità diverse, ovvero: *NWC – Navisworks Cache*, un file di interfaccia tra Navisworks e i software di BIM Authoring; *NWF – Navisworks File Set*, un file di settaggio che contiene informazioni relative all'assemblaggio e al coordinamento; *NWD – Navisworks Documentation*, un file per la revisione/condivisione e per l'interscambio di feedback sul modello.

Importando tutti i file sul software, oltre a visualizzare il modello tridimensionale dell'intera opera assemblata, si genera anche la rispettiva struttura dei dati componenti il modello federato (Figura 3.102a). Selezionando un qualsiasi elemento all'interno del modello è possibile risalire alla sua appartenenza ed inoltre è possibile consultare le informazioni che l'elemento stesso contiene (Figure 3.102b – 3.102c).

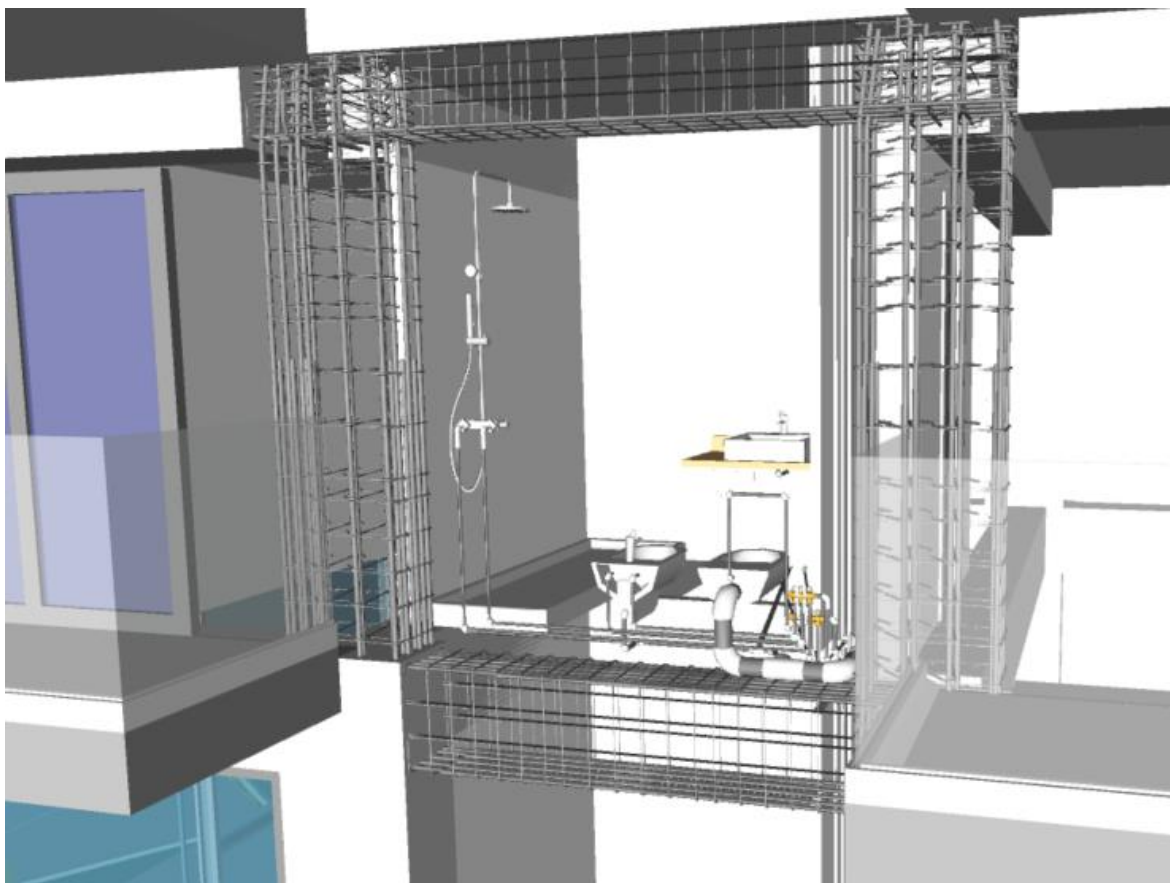
---

<sup>45</sup> Cosa sono i modelli federati BIM: caratteristiche, vantaggi, e strumenti operativi (<https://bim.acca.it/modelli-federati-bim-cosa-sono/> - accesso il 30/09/2023)

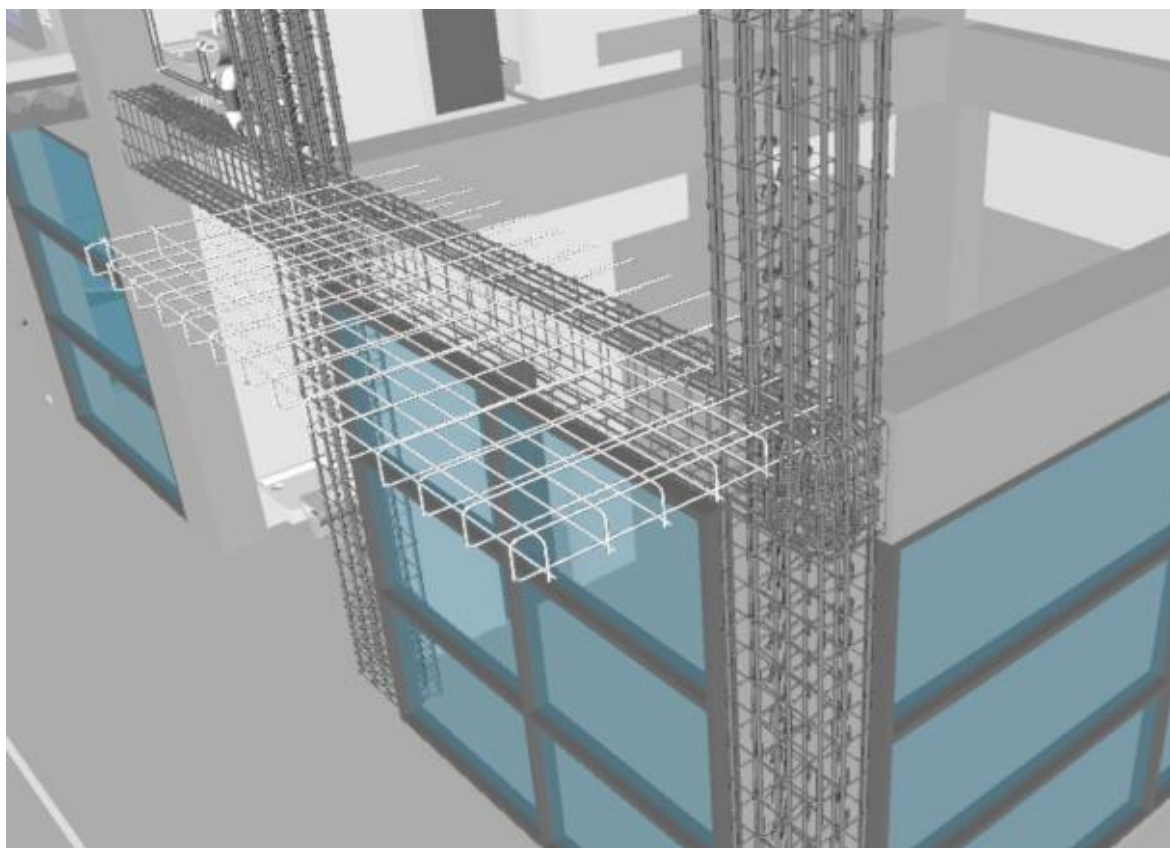


**Figura 3.102 – a) Struttura di selezione del caso studio su Navisworks Manage 2021; b) Percorso di appartenenza barra di armatura; c) Percorso di appartenenza piatto doccia;**

Il software consente di effettuare modifiche di visibilità su ogni elemento così da ottenere viste personalizzate che mostrano la distribuzione dei diversi elementi (Figure 3.103 – 3.104). In casi particolarmente complessi, queste viste possono rivelarsi molto utili anche come supporto delle maestranze, ricevendo delle informazioni aggiuntive che vanno ad integrare gli elaborati tecnici 2D. Nella figura 3.104, è possibile notare che è stato possibile creare, senza nessun problema, un unico modello federato con delle armature provenienti da due software diversi.



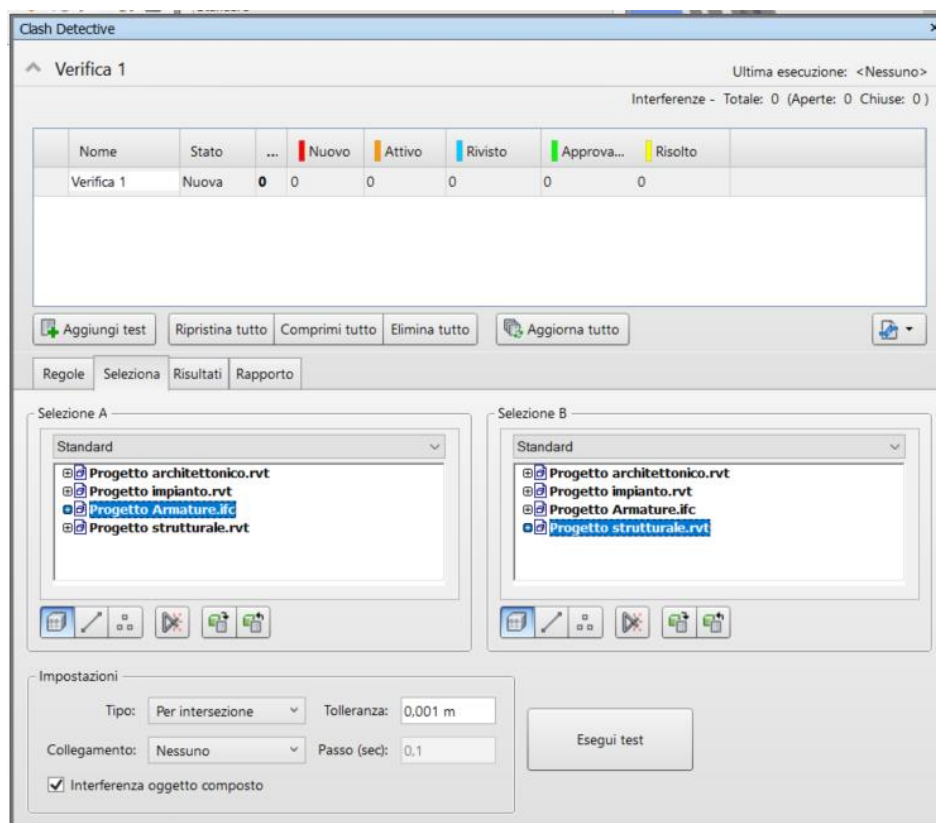
**Figura 3.103 – Vista 1 del modello federato su Navisworks Manage 2021.**



**Figura 3.104 – Vista 2 del modello federato su Navisworks Manage 2021.**

Dopo aver creato il modello federato, lo stesso è stato utilizzato per effettuare la *clash detection* tra i diversi modelli importati. Navisworks consente di definire la tipologia di test che si vuole effettuare. Il settaggio del test, in genere fatto all'inizio della commessa, dipende dalle regole definite dal BIM Coordinator nella matrice di *clash*.

Il software distingue le *clash* in quattro categorie: *Hard Clash*, *Hard Conservative*, *Soft Clash* e *Duplicati*, inoltre, è possibile definire la tolleranza geometrica delle stesse (Figura 3.105).



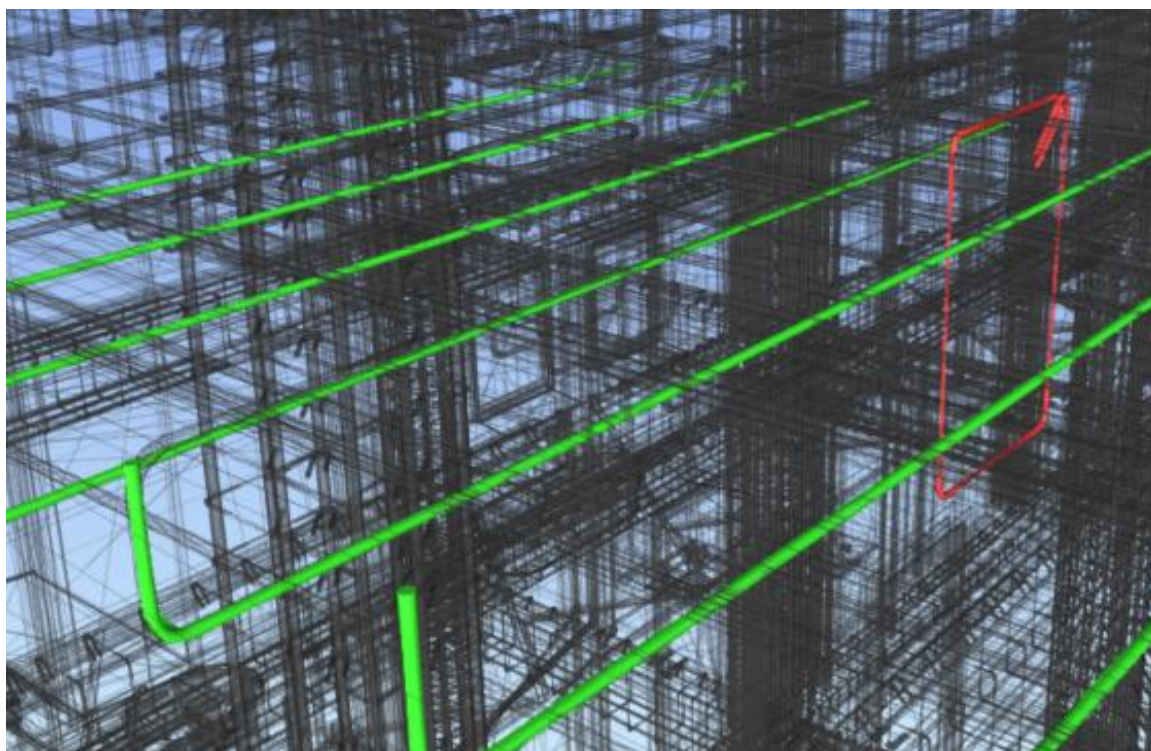
**Figura 3.105 – Menu impostazioni Clash Detective di Navisworks 2021.**

Dall'interfaccia *clash detective* è necessario selezionare gli elementi o modelli che si vogliono includere nel test. Le selezioni possono essere fatte per selezione diretta o per proprietà. Una volta definiti tutti gli input e avviato il test, il software restituirà un elenco di tutte le *clash*, che sono inoltre visibili per via grafica e attraverso appositi comandi le stesse sono analizzabili, associabili, ed è possibile esportare anche sotto forma di report. La generazione del rapporto è esportabile in molti formati, importabili e gestibili. Con questo software è anche possibile assegnare l'interferenza, al rispettivo gruppo di progettazione o progettista, attraverso la funzione *Associa*.

Nello studio proposto si è posta l'attenzione nell'effettuare un test di *clash detection* tra il



modello strutturale sviluppato con Revit ed il modello delle armature sviluppato con Jasp nel formato di interscambio IFC. In particolare, il test è stato effettuato al fine di verificare se le informazioni dei modelli di armatura provenienti dai due diversi software venivano interpretate correttamente dal software, il quale, quindi, ne avrebbe rilevato anche le possibili interferenze. Come è visibile dalla Figura 3.106, non sono state riscontrati errori di interpretazione delle informazioni e il software ha rilevato delle *clash* tra il gruppo di ferri del balcone e i ferri della trave.



**Figura 3.106 – Vista di una clash individuata con Navisworks 2021, relativa alle armature modellate con due diversi software Revit 2021 e Jasp 7.5.**

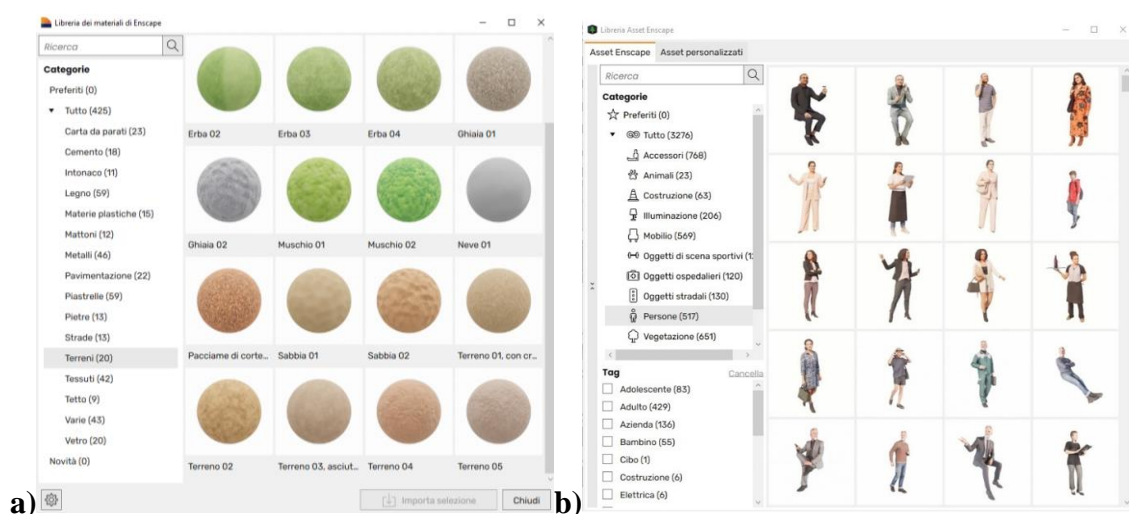
### **3.7 Dal modello architettonico alla realtà virtuale**

Come già illustrato, il modello BIM possiede la caratteristica intrinseca di poter effettuare diverse tipologie di analisi. Partendo dallo stesso modello, un'ulteriore possibilità è quella di poter realizzare viste fotorealistiche. Inoltre, con l'ausilio di specifici plug-in e di visori, vi è anche la possibilità di visualizzazione secondo Realtà Virtuale (VR), ottenendo una percezione quasi realistica del progetto.

Gli elementi che compongono il modello contengono già tutte le informazioni relative al materiale, tra cui anche quelle grafiche dello stesso. Queste caratteristiche vengono interpretate dai software di rendering per generare delle viste fotorealistiche.

In questo lavoro di tesi, per la realizzazione dei render interni ed esterni è stato utilizzato il software plug-in Enscape v.3.3 per Revit 2021. Tramite questo software è possibile

generare dei render direttamente all'interno del software Revit, poiché riconosce i materiali impostati in precedenza. Inoltre, tramite la libreria dei materiali di Enscape (Figura 3.107a) è possibile caricare ulteriori materiali per le finiture. In questo caso, dalla libreria di Enscape sono stati utilizzati solamente alcuni tipi di pavimentazione, il resto dei materiali del modello è stato settato all'interno di Revit. Oltre alla libreria materiali, nel software Enscape è disponibile una libreria degli “asset”, con la quale è stato possibile aggiungere delle risorse al modello 3D, come oggetti, persone, vegetazione, ecc... (Figura 3.108). Essendo la libreria degli “asset” di Enscape compatibile con i diversi software di modellazione 3D, è anche possibile creare da altri software degli elementi personalizzati da inserire nel modello BIM.



**Figura 3.107 – a) Libreria materiali di Enscape; b) Libreria Asset di Enscape.**

Dopo aver ultimato il modello, tramite l’assegnazione dei materiali e con l’inserimento degli asset, è stato possibile effettuare alcuni render degli spazi interni ed esterni. Per completare il modello è stata sviluppata parte degli esterni, così da configurarsi in un ambiente realistico. Per il render dei diversi ambienti sono state settate condizioni di luce naturale diverse, variando opportunamente la posizione del sole. Il software Enscape consente, per ogni render, di ottenere delle maschere di selezione che utili per una post-elaborazione con altri software di grafica, come ad esempio Photoshop. In questo lavoro sono stati riportati i render senza post elaborazione al fine di percepire il risultato grafico che è ottenibile anche per la visualizzazione immersiva tramite la realtà virtuale (Figure da 3.108 a 3.117). È possibile ottenere gli stessi risultati anche per visualizzare parti degli elementi costruttivi del fabbricato (Figure da 3.117 a 3.119).





**Figura 3.108 – Vista esterna 1.**



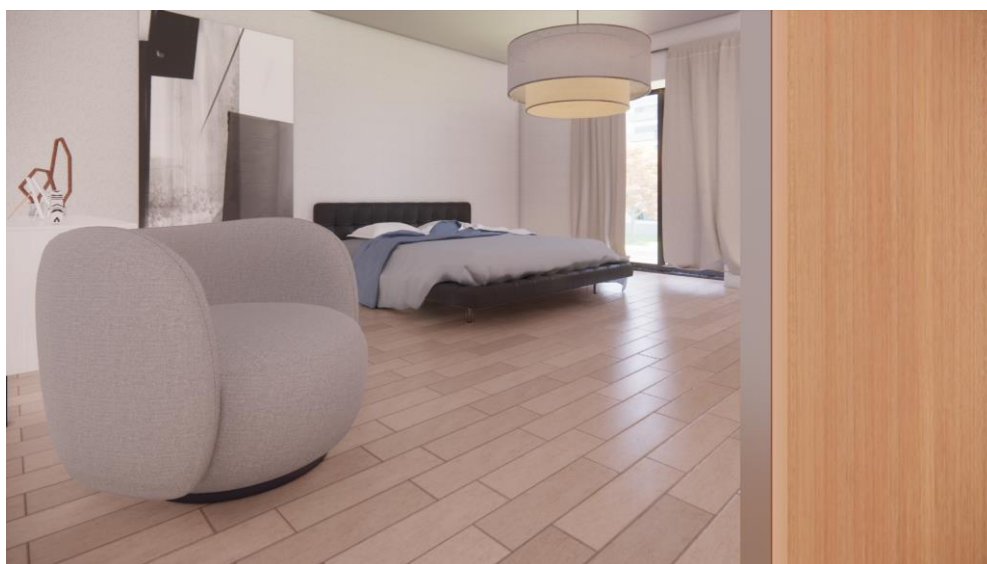
**Figura 3.109 – Vista esterna 2.**



**Figura 3.110 – Vista esterna 3.**



**Figura 3.111 – Vista esterna 4.**



**Figura 3.112 – Vista interna: camera da letto.**



**Figura 3.113 – Vista interna: ingresso soggiorno.**

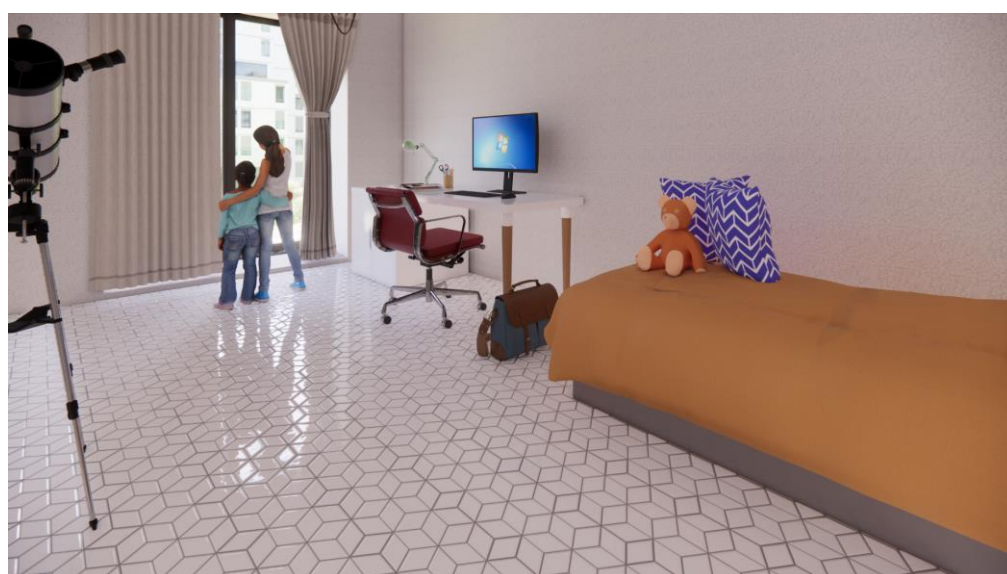




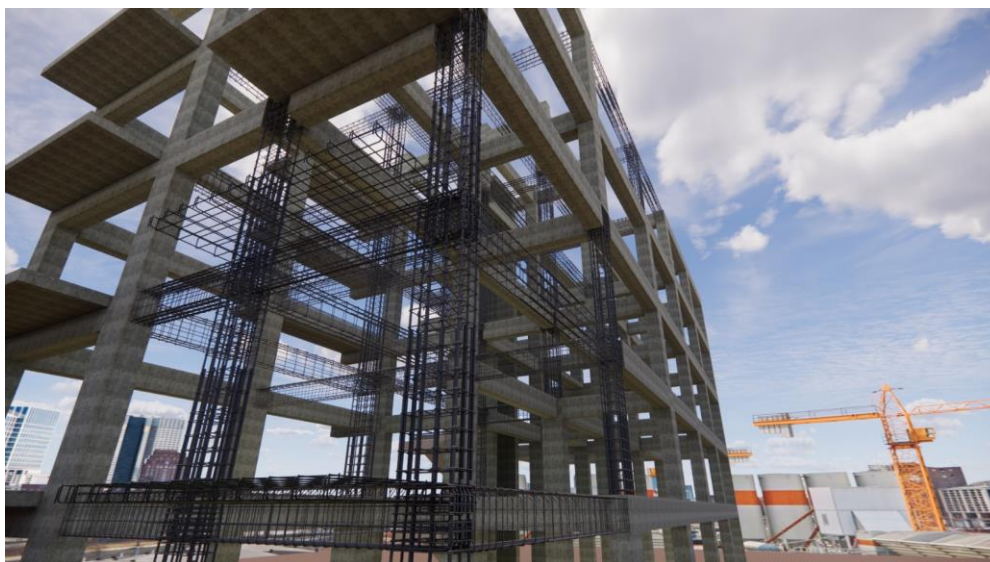
**Figura 3.114 – Vista interna: cucina.**



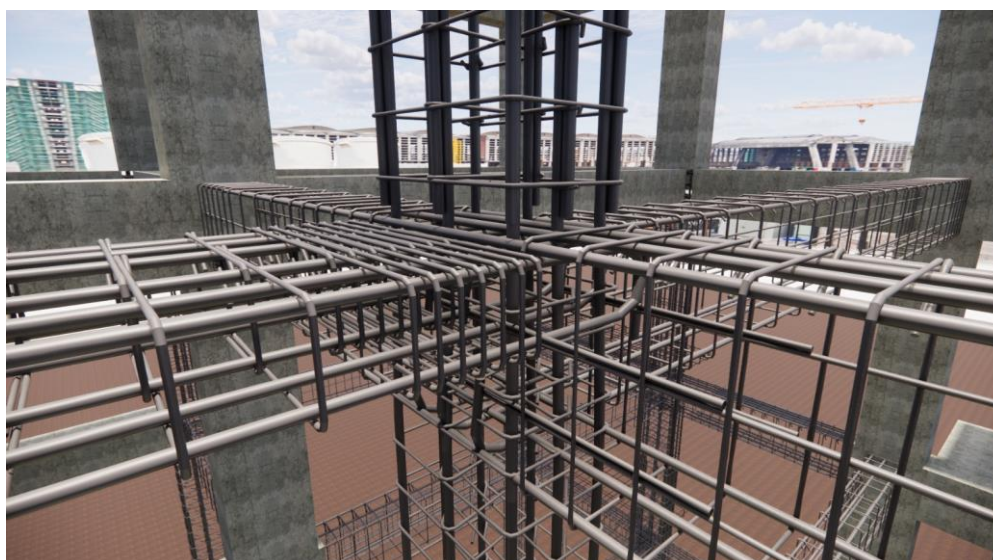
**Figura 3.115 – Vista interna: bagno doccia.**



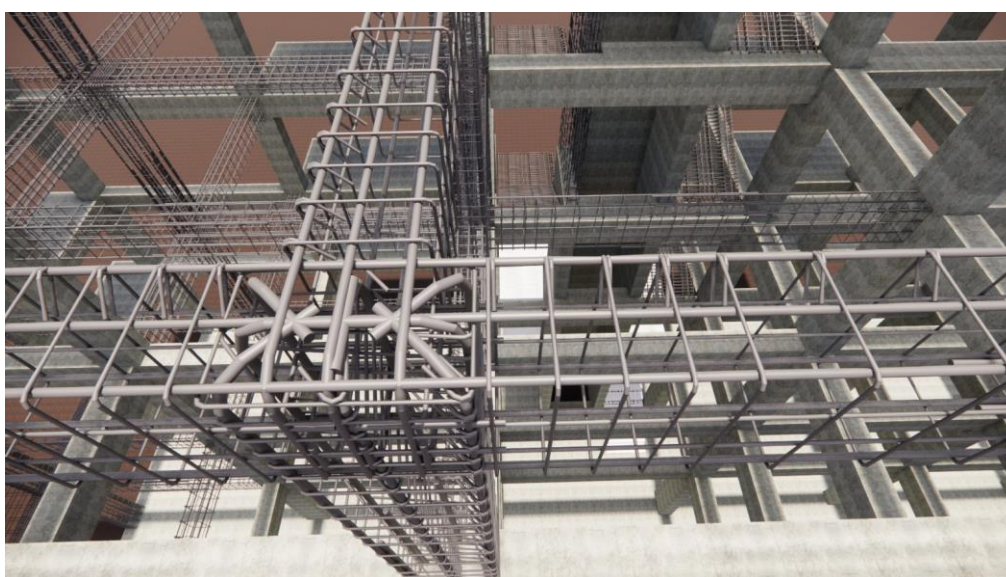
**Figura 3.116 – Vista interna: cameretta.**



**Figura 3.117 – Vista struttura 1.**



**Figura 3.118 – Vista struttura 2.**



**Figura 3.119 – Vista struttura 3.**

#### 4. CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

Lo studio proposto ha identificato diversi vantaggi e limiti che si manifestano adottando la metodologia BIM in ambito architettonico e strutturale. Grazie ad una modellazione *object-oriented*, gli strumenti BIM consentono di osservare la struttura che si sta sviluppando, analizzando contemporaneamente i vincoli imposti dalle diverse discipline all'interno di uno stesso modello.

Gli oggetti parametrici del modello Building Information Modeling (BIM) contengono diverse informazioni le quali, con opportuna manipolazione ed organizzazione, consentono di ottenere elaborati grafici e di estrarre molteplici dati dal modello. Inoltre, ogni volta che si verifica una modifica al progetto, tutte le informazioni vengono aggiornate riducendo drasticamente l'intervento manuale.

Dalla valutazione dell'attuale stato dell'arte sull'interoperabilità, all'interno del processo BIM di interscambio delle informazioni, tra il dominio architettonico e quello strutturale, si evince che ancora adesso vengono rilevate importanti problematiche di interpretazione dei dati. In particolare, molte delle cause di queste problematiche dovrebbero essere riconducibili ad una non corretta implementazione nei software degli standard internazionali di interscambio, tra cui l'IFC e le MVD.

Da un'analisi comparativa condotta a partire dal caso studio proposto si rileva già una buona interpretazione delle informazioni al passaggio tra i diversi domini e diversi software, sia con modalità di scambio diretto da file nativo, sia con l'utilizzo indiretto con il formato IFC.

La problematica che si riscontra non risolta consiste nell'interpretazione delle informazioni del modello geometrico-strutturale per la generazione del rispettivo modello di analisi strutturale. Anche sotto questo aspetto è stato rilevato un interesse da parte delle software house nel cercare una possibile soluzione. Tuttavia, ad oggi, non sono state presentate soluzioni soddisfacenti per l'automatizzazione di tale processo.

I test effettuati mostrano che negli ultimi anni si registra un significativo aumento d'interoperabilità tra i diversi software, rilevando alcuni miglioramenti riguardo il trasferimento di informazioni anche tramite formato di interscambio IFC.

È dimostrato comunque che la metodologia BIM può essere utilizzata efficacemente nello sviluppo di un progetto strutturale, con rilevanti contributi positivi.



Nel lavoro proposto sono state affrontate alcune analisi dei limiti di interoperabilità relativi ai software utilizzati, ed è stata proposta una per giungere ad un modello BIM federato che includa efficacemente il modello strutturale.

Tra i limiti relativi all'impiego di possibili soluzioni alternative ci sono sicuramente la diminuzione della produttività durante la fase di adattamento o rimodellazione del modello di analisi, cui si va a legare la maggiore probabilità di commettere errori nella progettazione. Ulteriore problematica riscontrata è quella della necessità di dover modificare due modelli ad ogni modifica strutturale apportata in fase di progettazione.

Nonostante quest'ultima criticità, le analisi condotte hanno dimostrato quanto l'interoperabilità dei diversi software consenta di ottenere diversi vantaggi, tra cui quella di poter effettuare delle analisi di interferenze tra i diversi modelli, al fine di poter individuare tutti i possibili conflitti tra le diverse discipline e risolverli preliminarmente in fase progettuale. Ulteriori benefici si possono ottenere nella possibilità di poter visualizzare i modelli BIM anche tramite dispositivi mobili, conferendo così un supporto aggiuntivo alle maestranze per l'interpretazione delle tavole esecutive di progetto direttamente in cantiere.

In conclusione, si può quindi affermare che il rapporto benefici/sforzi nella progettazione strutturale secondo la metodologia BIM oggi mostra risultati positivi, nonostante il workflow di progettazione integrata non risulti del tutto fluido ed esente da problematiche.

L'auspicio per il futuro consiste nell'ottenimento di un modello di analisi strutturale che possa essere automaticamente connesso al modello BIM, allo scopo di conseguire una progettazione integrata e sinergica. Tale approccio presuppone l'utilizzo di un unico modello centralizzato, sincronizzato con i risultati delle analisi strutturali, promuovendo così una coesione armoniosa nell'intero processo progettuale.

In questo contesto, il ruolo chiave del progettista emerge come imprescindibile, poiché nessun processo automatizzato, software o automazione può sostituire la sua capacità decisionale, sia in ambito tecnico che manageriale.

## **BIBLIOGRAFIA**

Caffi V. (2006). Le IT per il disegno di progetto, in Pratelli A., Codici del disegno di progetto, Udine, FORUM, p. 457.

Donato V. (2011). Building Information Modeling (BIM): analisi applicata al centro affari di Arezzo.

Eastman C., Teicholz P., Sacks R., Liston K., edizione italiana a cura di Di Giuda G.M., Villa V., (2016). Bibliografia essenziale: il BIM – Guida completa al Building Information Modeling.

Eastman C., Teicholz P., Sacks R., Liston K., BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling, Hoboken NJ, 2008.

Accelerating Digital Transformation Through BIM. Dodge Data & Analytics, 2021.

Rapporto sulla digitalizzazione e sulle gare BIM 2022, Analisi delle gare pubbliche e del mercato, Associazione delle Organizzazioni di Ingegneria e Consulenza Tecnico Economica (OICE), Roma, marzo 2023.

Pavan A., Mirarchi C., Giani M., (2022). BIM: Metodi e strumenti. Progettare, costruire e gestire nell'era digitale, Casa editrice Tecniche Nuove.

Sacks, R., Eastman, C., Lee, G., & Teicholz, P. (2018). A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors. Wiley.

Marcolin G., (2017), Structural Information Modeling, Proposta di sviluppo di Standard informativi openBIM per l'integrazione di analisi strutturali dell'esistente, (MSc thesis, Università degli studi di Padova).

Vaghi, F. (2021). Customized BIM Adoption & Implementation Path and Digitalization of the Certification Exam for BIM Experts [MSc thesis]. Politecnico di Milano.

Somaini, J. (2021). BIM Interoperability in the Structural Engineer Workflow: State-of-the-art from a Literature Review [MSc thesis]. Politecnico di Milano.

Muller, M. F., Garbers, A., Esmanioto, F., Huber, N., Loures, E. R., & Canciglieri, O. (2017). Data interoperability assessment through IFC for BIM in structural design – a five-year gap analysis. Journal of Civil Engineering and Management, 23, 943-954.

Sibenik, G., & Kovacic, I. (2020). Assessment of model-based data exchange between architectural design and structural analysis. Journal of Building Engineering, 32, 101589.



Borrmann A., Konig M., Koch C., Beetz J., (2015). Building Information Modeling, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, Germany, 2015.

Aldegeily M, Zhang J., (2018). From architectural design to structural analysis: a data driven approach to study building information Modeling (BIM) interoperability, in: T. Sulbaran (Ed.), Proc., 54th ASC Annual International Conference, ASC Associated Schools of Construction, Fort Collings, Colorado, pp. 537–545.

Lai, H., & Deng, X. (2018). Interoperability analysis of IFC-based data exchange between heterogeneous BIM software. *Journal of civil engineering and management*, 24(7), 537-555.

Ren, R., Zhang, J., & Dib, H. N. (2018, March). BIM interoperability for structural analysis. In *Construction Research Congress 2018: Construction Information Technology*.

Birkemo, A. S., Hjortland, S. C., & Samarakoon, S. S. M. (2019). Improvements For The Workflow Interoperability Between Bim And Fem Tools. *WIT Transactions on The Built Environment*, 192, 317-327.

Atia, K. A. (2021), BIM interoperability in structural analysis (MSc thesis, Politecnico di Milano).

Huahui, Lai & Zhou, Cheng & Deng, Xueyuan. (2019). Exchange requirement-based delivery method of structural design information for collaborative design using industry foundation classes. *JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING AND MANAGEMENT*. 25. 559-573. 10.3846/jcem.2019.9870.

Gomes, A.M.; Azevedo, G.; Sampaio, A.Z.; Lite, A.S. BIM in Structural Project: Interoperability Analyses and Data Management. *Appl. Sci.* 2022, 12, 8814. <https://doi.org/10.3390/app12178814>.

Khalil Idrissi Gartoumi, Smail Zaki, Mohamed Aboussaleh, (2023) Building information modeling (BIM) interoperability for architecture and engineering (AE) of the structural project: A case study, *Materials Today: Proceedings*, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.05.408>.(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785323030444>).

Nguyen, Quan & Luu, Quang Phuong & Yen, Ngo. (2020). Application of BIM in design conflict detection: a case study of Vietnam. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 869. 022038. 10.1088/1757-899X/869/2/022038.

Sibenik G., Kovacic I, (2020), Assessment of model-based data exchange between architectural design and structural analysis, Journal of Building Engineering, Volume 32, 2020, 101589, ISSN 2352-7102, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101589>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710220302448>).

Ramaji I.J., Memari A. M., (2018), Interpretation of structural analytical models from the coordination view in building information models, Automation in Construction, Volume 90, Pages 117-133, ISSN 0926-5805, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.02.025>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580518301286>).

## SITOGRAFIA

Fermat design. Soluzioni BIM applicate ai prefabbricatori e costruttori, (<https://www.fermatdesign.it/soluzioni-bim-applicate-ai-prefabbricatori-e-costruttori> - accesso il 16/09/2023).

Zacchei V. (2011). Building information model (BIM). (<https://www.teknoring.com/wikitecnica/tecnologia/building-information-model-bim/> - accesso il 16/09/2023).

Casalicchio A. Le 10 dimensioni del BIM: quali sono e cosa significano. (<https://www.nke360.com/10-dimensioni-bim-quali-sono/#:~:text=Le%20Dimensioni%20servono%20a%20schematizzare,affinch%C3%A9%20vengano%20integrate%20nella%20normativa> - accesso il 16/09/2023).

Zacchei V. (2011). Building information model (BIM). (<https://www.teknoring.com/wikitecnica/tecnologia/building-information-model-bim/> - accesso il 16/09/2023).

Dodge Data & Analytics (<http://www.construction.com> – accesso il 10/09/2023).

Di Giacomo E., Lo stato dell'arte del BIM nel mondo – Obblighi e Standards accelerando l'adozione della digitalizzazione, BIM Conference 2021 (<https://www.nke360.com/il-bim-nel-mondo-obblighi-standards/> - accesso il 10/08/2023).

Rota A., Versolato A., (2023) Applicazione del BIM nel Nuovo Codice dei Contratti Pubblici, Rivista tecnica digitale Ingenio-web.it, (<https://www.ingenio-web.it/articoli/applicazione-del-bim-nel-nuovo-codice-dei-contratti-pubblici/> - accesso il 14/09/2023).

Rota A., Versolato A., (2023) Nuovo Codice dei Contratti Pubblici: inquadramento e principi generali su digitalizzazione e BIM, Rivista tecnica Digitale: Ingenio-web.it, (<https://www.ingenio-web.it/articoli/nuovo-codice-dei-contratti-pubblici-inquadramento-e-principi-generalis-su-digitalizzazione-e-bim/> - accesso il 14/09/2023).

I LOD (Livelli di Dettaglio) nel BIM. 4mgroup.it (<https://4mgroup.it/blog/i-lod-del-bim-spiegati-bene> - accesso il 10/09/2023).

buildingSMART Italia (<https://www.buildingsmartitalia.org/standard/> - accesso il 10/09/2023).

D Gregorio M., Romano A., Normativa BIM: da dove partire? – Ingenio-web.it, Rivista tecnica digitale (<https://www.ingenio-web.it/articoli/normativa-bim-da-dove-partire/> - accesso il 18/09/2023).

UNI 11337 (<https://www.uni.com/?s=uni+11337> - accesso il 18/09/2023).

ISO 19650 (<https://www.uni.com/?s=iso+19650> - accesso il 18/09/2021).

Manuale Jasp 7.5 (<https://www.ingegnerianet.it/manuale-jasp/> - accesso il 20/07/2023).

I livelli di maturità BIM: BIM level 3 (<https://bim.acca.it/livelli-maturita-bim-level-3/#:~:text=Il%20BIM%20level%203%20rappresenta,ottenendo%20aggiornamenti%20in%20tempo%20reale.> – accesso il 23/09/2023).

McGraw Hill Construction. (2014). The Business Value of BIM for Construction in Major Global Markets: How Contractors Around the World Are Driving Innovation with Building Information Modeling. McGraw Hill. (Disponibile su: <https://www.construction.com/toolkit/reports/bim-business-value-construction-global-markets>).

Furcolo, N. IFC, cos'è: caratteristiche, vantaggi ed importanza della certificazione IFC. (<https://biblus.acca.it/focus/ifc-cose-e-quali-sono-i-vantaggi> - accesso il 23/09/2023).

Progettazione integrata BIM MEP: modalità, vantaggi e soluzioni (<https://bim.acca.it/progettazione-integrata-bim-mep/> - accesso il 28/09/2023).

Piccinelli M., Overview dello strumento di Autodesk per la clash detection (<https://www.bimfactory.it/autodesk-navisworks-uno-strumento-di-clash-detection/#:~:text=La%20definizione%20del%20tipo%20di,sempre%20nella%20matrice%20di%20Clash.> – accesso il 29/09/2023).

## INDICE DELLE FIGURE

Figura 1.1 - Interconnessioni tra le diverse figure interessate dal processo edilizio, secondo l'approccio processuale BIM (Fonte: Fermat design. Soluzioni BIM applicate ai prefabbricati e costruttori).....	9
Figura 1.2 – Curva di MacLeamy “effect/effort” (Fonte: La logica dell'anticipazione nel BIM ( <a href="https://docs.dicatechpoliba.it/filemanager/25/a,a,%202018-19/BIM/Anticipazione%20nel%20BIM.pdf">https://docs.dicatechpoliba.it/filemanager/25/a,a,%202018-19/BIM/Anticipazione%20nel%20BIM.pdf</a> – accesso il 22/09/2023). ....	10
Figura 1.3 – Dimensioni BIM. (Fonte: Casalicchio A. Le 10 dimensioni del BIM. Nike360.com).....	12
Figura 1.4 – Analisi e controlli associati alla rispettiva dimensione BIM (Fonte: BIM Dimension, <a href="https://docs.dicatechpoliba.it/filemanager/25/a,a,%202018-19/BIM/BIM%20Dimension.pdf">https://docs.dicatechpoliba.it/filemanager/25/a,a,%202018-19/BIM/BIM%20Dimension.pdf</a> – accesso il 22/09/2023). ....	13
Figura 1.5 – Interconnessioni tra il modello BIM ed i possibili controlli ed analisi su modello digitale. (Fonte: Zacchei V. (2011). Building information model (BIM). Teknoring.com). ....	15
Figura 1.6 – LOD, LOG e LOI per gli oggetti digitali BIM (rielaborazione UNI 11337-4:2017) (Fonte: Pavan A. et Al., (2022), BIM: Metodi e strumenti. Progettare, costruire e gestire nell'era digitale, Tecniche Nuove). ....	16
Figura 1.7 – Evoluzione informativa nel processo digitale (rielaborazione UNI 11337-4:2017) (Fonte: Pavan A. et Al., (2022), BIM: Metodi e strumenti. Progettare, costruire e gestire nell'era digitale, Tecniche Nuove). ....	17
Figura 1.8 - Cuneo di Bew-Richards (Fonte: Sacks, R., et al., (2018), A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors). ....	18
Figura 1.9 - Caratteristiche dei livelli di maturità del BIM (Fonte: Vaghi, F. (2021), Customized BIM Adoption & Implementation Path and Digitalization of the Certification Exam for BIM Experts).....	20
Figura 1.10 – Confronto tra i livelli di maturità BIM delle norme britanniche, italiane e internazionali (Fonte: <a href="http://www.bim.acca.it">www.bim.acca.it</a> , (2022), I livelli di maturità BIM: BIM level 3) ...	20
Figura 1.11 - Cronologia dell'adozione del BIM per paese. (Fonte: Accelerating Digital Transformation Through BIM. Dodge Data & Analytics, 2021). ....	21
Figura 1.12 - Cronologia dell'adozione del BIM per tipo di azienda (Fonte: Accelerating Digital Transformation Through BIM. Dodge Data & Analytics, 2021). ....	23
Figura 1.13 – Analisi delle attività di progettazione, per tipo di azienda (Fonte:	

Accelerating Digital Transformation Through. Dodge Data & Analytics, 2021).....	23
Figura 1.14 – Analisi di attività connesse all’edilizia, per tipo di azienda (Fonte: Accelerating Digital Transformation Through BIM. Dodge Data & Analytics, 2021). .....	24
Figura 1.15 - Analisi di attività connesse alla pianificazione, per tipo di azienda (Fonte: Accelerating Digital Transformation Through BIM. Dodge Data & Analytics, 2021). .....	24
Figura 1.16 – Andamento numero di tutti i bandi BIM (2015-2022) (Fonte: Report OICE BIM 2023).....	25
Figura 1.17 – Andamento numero bandi BIM (2020-2022) (Fonte: Report OICE BIM 2023). .....	26
Figura 1.18 - Numero bandi BIM sul totale di bandi per S.A.I. nel 2022 (Fonte: Report OICE BIM 2023). .....	26
Figura 1.19 – (a) Percentuale bandi BIM per attività, affidate nel 2022. (b) Percentuale bandi BIM per classi di importo, affidate nel 2022 (Fonte: Report OICE BIM 2023).....	27
Figura 1.20 – (a) Percentuale bandi BIM per tipologia di intervento nel 2022; (b) Percentuale bandi BIM per tipologia di opera nel 2022 (Fonte: Report OICE BIM 2023).	28
Figura 1.21 – Percentuale di dettaglio dei bandi BIM per opere puntuali, nel 2022 (Fonte: Report OICE BIM 2023). .....	28
Figura 1.22 – Sequenza temporale norme UNI EN ISO 19650 e delle ulteriori norme ISO, attualmente in vigore (Fonte: D Gregorio M., Romano A., Normativa BIM: da dove partire? Ingenio Rivista tecnica digitale, <a href="https://www.ingenio-web.it/articoli/normativa-bim-da-dove-partire/">https://www.ingenio-web.it/articoli/normativa-bim-da-dove-partire/</a> ).....	33
Figura 1.23 – Sequenza temporale norme UNI 11337, attualmente in vigore (Fonte: D Gregorio M., Romano A., Normativa BIM: da dove partire? Ingenio Rivista tecnica digitale, <a href="https://www.ingenio-web.it/articoli/normativa-bim-da-dove-partire/">https://www.ingenio-web.it/articoli/normativa-bim-da-dove-partire/</a> - accesso il 24/09/2023).....	34
Figura 1.24 - Sequenze temporali delle ulteriori norme CEN riguardanti il BIM, attualmente in vigore (Fonte: D Gregorio M., Romano A., Normativa BIM: da dove partire? Ingenio Rivista tecnica digitale, <a href="https://www.ingenio-web.it/articoli/normativa-bim-da-dove-partire/">https://www.ingenio-web.it/articoli/normativa-bim-da-dove-partire/</a> ).....	34
Figura 2.1 – Workflow CAD, proposto da Muller, M.F. et al., 2017.....	36
Figura 2.2 - Workflow BIM, proposto da Muller, M.F. et al., 2017. ....	37
Figura 2.3 – Possibilità per generare un’analisi strutturale, partendo da un modello proveniente da un software di BIM authoring (Sibenik et Kovacic, 2020). .....	38
Figura 2.4 – Data transmission flow nei processi interni al progetto e a livello inter-	



organizzativo (Sibenik et Kovacic, 2020).....	40
Figura 2.5 - Architettura dello schema dati di IFC e layer concettuali (Fonte: <a href="https://standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4_1/FINAL/HTML/introduction.htm">https://standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4_1/FINAL/HTML/introduction.htm</a> - accessi il 27/09/2023). ....	46
Figura 2.6 – Schematizzazione dello schema IFC composto da singole entità. (Fonte: Tetervov V., <a href="https://www.linkedin.com/pulse/ifc-mvd-ids-whats-all-vitalij-tetervov/">https://www.linkedin.com/pulse/ifc-mvd-ids-whats-all-vitalij-tetervov/</a> - accesso il 26/09/2023).....	49
Figura 2.7 - Processo di trasferimento IFC con MVD (Fonte: <a href="https://en.buildingsmart.org.jp/ifc/mvd/">https://en.buildingsmart.org.jp/ifc/mvd/</a> - accesso il 27/09/2023).....	51
Figura 2.8 – Schematizzazione delle MVD (Fonte: Tetervov V., <a href="https://www.linkedin.com/pulse/ifc-mvd-ids-whats-all-vitalij-tetervov/">https://www.linkedin.com/pulse/ifc-mvd-ids-whats-all-vitalij-tetervov/</a> - accesso il 26/09/2023). ....	53
Figura 2.9 - Esempi di modelli generati nel Software REVIT e nel Software TQS (Muller et al., 2017).....	61
Figura 2.10 – Trave curva frammentata in piccole parti (Muller et al., 2017).....	62
Figura 2.11 – Oggetti testati per l'esperimento di interoperabilità (Lai et Deng, 2018). ....	63
Figura 2.12 – Workflow esperimento di interoperabilità dei dati per lo scambio di dati IFC tra software BIM (Lai et Deng, 2018).....	63
Figura 2.13 – a) Importazione del modello Tekla Structure negli altri software utilizzati nel test; b) Riesportazione dei modelli in SMV; c) Dati di confronto dopo la riesportazione (Lai et Deng, 2018). ....	64
Figura 2.14 – Diversa rappresentazione geometrica delle barre d'armatura nel formato IFC dovuta al trasferimento dei dati (Lai et Deng, 2018). ....	65
Figura 2.15 – Elementi in acciaio utilizzati per l'analisi di interoperabilità (Ren et al., 2018). ....	66
Figura 2.16 – Struttura in c.a. creata per l'analisi (Aldegeily M., 2018). ....	67
Figura 2.17 – Combinazioni software e metodi di scambio usati per il test (Aldegeily M., 2018). ....	68
Figura 2.18 – a) Workflow di trasferimento delle informazioni, basato su IDM e MVD; b) Workflow delle informazioni migliorato basato sui requisiti di scambio definiti dall'utente (Lai et al., 2019).....	72
Figura 2.19 – Oggetti strutturali per diverse esigenze di scambio (Lai et al., 2019). ....	74
Figura 2.20 - L'interfaccia utente dell'algoritmo per la generazione del modello di scambio nella progettazione strutturale (Lai et al., 2019). ....	75

Figura 2.21 - Attributi richiesti nell'oggetto IfcBeam, nel linguaggio EXPRESS-G (IFC2x3) (Lai et al., 2019).....	77
Figura 2.22 - Requisiti per lo scambio di informazioni dalla struttura all'architettura (Lai et al., 2019). ....	78
Figura 2.23 - Dimensioni dei file dei modelli strutturali basati su IFC (Lai et al., 2019). ..	79
Figura 2.24 - Modello Revit dell'edificio Arkivenes Hus (Birkemo et al., 2019). ....	81
Figura 2.25 – Workflow utilizzati per l'analisi con: (a) Focus Konstruksjon; (b) Robot Structural Analysis Pro; (c) SOFiSTiK (Birkemo et al., 2019). ....	81
Figura 2.26 – Workflow proposto per la costruzione di modelli analiti coerenti (Birkemo et al., 2019). ....	83
Figura 2.27 – Modelli IFC esportati dai software di BIM Authoring (Sibenik et Kovacic, 2020). ....	85
Figura 2.28 - Edificio utilizzato ai fini dell'analisi con relativa pianta di fondazione (Gomes et al., 2022).....	93
Figura 2.29 – Modelli strutturali del nucleo degli ascensori, delle stelle e modello BIM strutturale finale (Gomes et al., 2022). ....	93
Figura 2.30 – Errori riscontrati nel modello analitico generato automaticamente (Gomes et al., 2022). ....	94
Figura 2.31 – Comandi per il controllo del modello analitico (Gomes et al., 2022). ....	94
Figura 2.32 - Diagramma della deformazione dei solai e vista dell'armatura in un pilastro e una trave su Robot Structural Analysis (Gomes et al., 2022). ....	95
Figura 2.33 – Trasferimento armatura dei plinti da Robot a Revit (Gomes et al., 2022). ...	96
Figura 2.34 – Modellazione manuale delle armature su Revit (Gomes et al., 2022). ....	96
Figura 2.35 - Funzionalità di Revit per la copia delle armature su elementi simili (Gomes et al., 2022). ....	96
Figura 2.36 – Pianta del piano terra (a) e del secondo piano (b), del modello proposto per l'analisi (Gartoumi et al., 2023).....	97
Figura 2.37 – Workflow di lavoro proposto per il caso studio (Gartoumi et al., 2023).....	98
Figura 2.38 – (a) Spaccato modello architettonico 3D; (b) Vista esterna modello architettonico; (Gartoumi et al., 2023).....	98
Figura 2.39 – (a) Vista 3D modello strutturale; (b) Vista 3D modello federato; (Gartoumi et al., 2023). ....	98
Figura 2.40 – Interfaccia Revit con i comandi per l'esportazione su Robot (Gartoumi et al., 2023). ....	99

Figura 3.1 – Concept architettonico: pianta piano tipo (a) e assonometrie (b). .....	101
Figura 3.2 – Workflow del processo di progettazione architettonico-strutturale (Fonte: Donato V., (2011), Building Information Modeling (BIM): analisi applicata al centro affari di Arezzo). .....	102
Figura 3.3 - Workflow del processo di progettazione architettonico-strutturale modificato. Le linee tratteggiate vanno a definire il sotto flusso della sola progettazione strutturale. .	103
Figura 3.4 - Workflow del processo di <i>clash detection</i> utilizzato per la validazione dei singoli modelli e del modello federato. ....	105
Figura 3.5 – Tracciamento delle griglie per la costruzione del modello architettonico in Revit 2021. ....	105
Figura 3.6 – Nuovo progetto, selezione della disciplina per la costruzione del modello Revit 2021. ....	106
Figura 3.7 – Costruzione della pianta architettonica del piano tipo su Revit 2021. ....	106
Figura 3.8 – Workflow trasmissione dati e software utilizzati (workflow modificato - fonte di partenza Muller, et al., 2017). ....	107
Figura 3.9 – Menu esportazione file *.dxf, da Revit. ....	108
Figura 3.10 – Importazione file *.dxf su Jasp. ....	108
Figura 3.11 – Inserimento fili fissi su Jasp. ....	109
Figura 3.12 – Inserimento piani su Jasp. ....	109
Figura 3.13 – Inserimento pilastri, travi e pareti su Jasp. ....	110
Figura 3.14 – Inserimento solai e balconi su Jasp. ....	111
Figura 3.15 – Modello 3D delle interconnessioni tra gli elementi strutturali. ....	111
Figura 3.16 – Modello 3D degli elementi componenti la struttura (vista 1). ....	112
Figura 3.17 - Modello 3D degli elementi componenti la struttura (vista 2). ....	112
Figura 3.18 – Dati generali della struttura e della zona climatica. ....	113
Figura 3.19 – a) Interfaccia di Jasp per la definizione dell’azione dovuta al vento, con il dettaglio dei parametri utilizzati per l’analisi; b) Profilo del vento calcolato dal software. ....	114
Figura 3.20 – Interfaccia di Jasp per la definizione dell’azione sismica, con il dettaglio dei parametri utilizzati per l’analisi. ....	114
Figura 3.21 – a) Interfaccia parametri per il calcolo del fattore di comportamento “q”; b) Spettri di progetto calcolati dal software. ....	115
Figura 3.22 – Interfaccia dei parametri di verifica degli elementi strutturali. ....	115
Figura 3.23 – Interfaccia dei criteri di progetto degli elementi strutturali. ....	116

Figura 3.24 – Interfaccia per la definizione dell'analisi sismica, con il dettaglio dei parametri utilizzati per l'analisi. ....	116
Figura 3.25 – Cronologia dell'analisi eseguita. ....	119
Figura 3.26 - Diagrammi My-Mz combinazione sismica SLD n.1 (min -136kNm – max 425kNm). ....	120
Figura 3.27 - Diagrammi My-Mz combinazione sismica SLV n.1 (min -132kNm – max 510kNm). ....	120
Figura 3.28 - Diagrammi spostamenti combinazione sismica SLD n.1 (max 14,9 mm)...	121
Figura 3.29 – Diagrammi spostamenti combinazione sismica SLV n.1 (max 17,4 mm). .	121
Figura 3.30 – Diagramma verifiche S.L.U. My/Mry (max 0.9874). ....	122
Figura 3.31 - Diagramma verifiche S.L.U. N/Nmax (max 0.374). ....	122
Figura 3.32 – Diagramma verifiche totali SLU (max 0.997). ....	123
Figura 3.33 – Diagramma verifiche geometriche totale (max 1.000). ....	123
Figura 3.34 – Menu di esportazione file IFC di Jasp. ....	124
Figura 3.35 – Modello IFC 2x3 della struttura con i solai, esportato da Jasp 7.5. ....	125
Figura 3.36 - Modello IFC 2x3 dell'armatura, esportato da Jasp 7.5. ....	125
Figura 3.37 - Modello 3D strutturale in formato IFC2x3, ottenuto con Jasp 7.5 ed importata nei visualizzatori IFC: a) BIMvision 2.27.5; b) Solibri Anywhere 9.13.5. ....	126
Figura 3.38 - Modello 3D strutturale in formato IFC2x3, ottenuto con Jasp 7.5 ed importata nei software: a) Revit 2021 (dominio architettonico); b) Revit 2024 (dominio architettonico); ....	126
Figura 3.39 – Modello 3D strutturale in formato IFC2x3, ottenuto con Jasp 7.5 ed importata nei software: a) Revit 2021 (dominio strutturale); b) Revit 2024 (dominio strutturale); ....	127
Figura 3.40 – Viste laterali del modello strutturale IFC2x3, ottenuto con Jasp 7.5 ed importato nel software Revit 2021 (dominio strutturale). ....	127
Figura 3.41 – Modello 3D strutturale in formato IFC2x3, ottenuto con Jasp 7.5 ed importata nei software: a) Navisworks Manage 2021; b) Navisworks Manage 2024. ....	128
Figura 3.42 – Modello 3D armature in formato IFC2x3, ottenute con Jasp 7.5 ed importata nei visualizzatori IFC: a) BIMvision 2.27.5; b) Solibri Anywhere 9.13.5. ....	130
Figura 3.43 - Modello 3D armature in formato IFC2x3, ottenute con Jasp 7.5 ed importata nei software: a) Revit 2021 (dominio architettonico); b) Revit 2024 (dominio architettonico); ....	130
Figura 3.44 - Figura 3.39 – Modello 3D armature in formato IFC2x3, ottenute con Jasp 7.5	

ed importata nei software: a) Revit 2021 (dominio strutturale); b) Revit 2024 (dominio strutturale); .....	130
Figura 3.45 - Modello 3D armature in formato IFC2x3, ottenute con Jasp 7.5 ed importata nei software: a) Navisworks Manage 2021; b) Navisworks Manage 2024 .....	131
Figura 3.46 - Informazioni barra armatura presenti nel file IFC creato con Jasp e visualizzato con Solibri Anywhere 9.13.5. ....	132
Figura 3.47 – Viste di dettaglio dei gruppi di barre con le proprietà delle stesse. ....	133
Figura 3.48 – Opzioni elemento su Navisworks 2021: comando nascondi. ....	134
Figura 3.49 - Opzioni elemento su Navisworks 2021: comando trasparenza.....	135
Figura 3.50 – Vista del file strutturale federato su Navisworks 2021.....	135
Figura 3.51 – TimeLiner di Navisworks per l’assegnazione dei tempi e costi agli elementi componenti il modello. ....	136
Figura 3.52 – Comando <i>Clash Detective</i> di Navisworks 2024. ....	137
Figura 3.53 – Interferenze tra le barre di armatura. ....	137
Figura 3.54 – Interferenze tra le travi in cls. ....	137
Figura 3.55 – Interferenze tra le barre di armatura e le travi in cls.....	138
Figura 3.56 – Esecutivi ottenuti con il software Jasp 7.5: a) pilastro filo 12; b) sezione trasversale travata 10-11-12; c) sezione longitudinale travata 10-11-12. ....	139
Figura 3.57 – Dettaglio nodo piano primo, filo 12, visualizzato con Solibri Anywhere. ...	140
Figura 3.58 – File importati per la creazione del modello strutturale su Revit: a) pianta architettonica del piano tipo; b) vista laterale modello strutturale IFC creato con Jasp 7.5. ....	141
Figura 3.59 – Creazione dei livelli su Revit per la creazione del modello strutturale. ....	141
Figura 3.60 – Inserimento dei pilastri sul modello strutturale di Revit. ....	142
Figura 3.61 – (a) Proprietà dell’oggetto pilastro; (b) Proprietà del tipo della famiglia piastra;.....	142
Figura 3.62 – Proprietà calcestruzzo dal browser materiali di Revit. ....	143
Figura 3.63 – (a) Proprietà dell’oggetto trave in cls; (b)Proprietà del tipo della famiglia trave in cls; .....	144
Figura 3.64 - Inserimento delle travi nel modello strutturale, creato con Revit. ....	144
Figura 3.65 – Vista assonometrica della struttura a telaio dell’edificio. ....	145
Figura 3.66 – Esempio LOD solai in laterocemento, secondo la norma UNI 11337-4. ....	145
Figura 3.67 – a) Tipologie di pavimenti strutturali disponibili su Revit; b) Limitazioni in Revit per il solaio strutturale in laterocemento (Fonte: Graitec Italia). ....	146

Figura 3.68 – Esempio di famiglia parametrica di un solaio in laterocemento creato con Revit (Fonte: Graitec Italia).....	147
Figura 3.69 – Inserimento manuale delle barre di armatura del travetto con il software Revit (Fonte: Graitec Italia).....	147
Figura 3.70 – Inserimento semiautomatico dell’armatura della soletta con il plug-in PowerPack per Revit (Fonte: Graitec Italia).....	148
Figura 3.71 – Vista 3D della struttura modellata su Revit, completa di balconi e scale....	149
Figura 3.72 – Vista 3D sovrapposizione modello IFC Jasp – modello Revit.....	149
Figura 3.73 – Viste laterali sovrapposizione modello IFC Jasp – modello Revit.....	150
Figura 3.74 – Comandi di Revit per il posizionamento manuale dell’armatura.....	151
Figura 3.75 – Inserimento manuale dell’armatura di un singolo balcone con Revit 2021.	151
Figura 3.76 – Inserimento manuale dell’armatura su tutti i balconi laterali della struttura. .....	152
Figura 3.77 – Comandi della scheda analizza di Revit 2021.....	153
Figura 3.78 – Possibile workflow di trasmissione dati con l’utilizzo del software Robot, relativo al caso studio proposto (workflow modificato - fonte di partenza Muller, et al., 2017). ....	153
Figura 3.79 – a) Modello strutturale creato con Revit 2021; b) Modello analitico generato in modo automatico da Revit 2021, con l’aggiunta degli incastri alla base. ....	154
Figura 3.80 – Evidenze sugli errori di non ortogonalità degli assi del modello di analisi: a) modello analitico generato in automatico da Revit 2021; b) modello strutturale implementato su Revit 2021; .....	155
Figura 3.81 – a) Barra dei comandi per il modello di analisi strutturale su Revit 2024; c) Interfaccia automazione modello analitico. ....	156
Figura 3.82 – Interfaccia di definizione degli input per la generazione del modello di analisi. ....	156
Figura 3.83 – a) Modello di analisi generato su Revit 2024, con il comando automazione analitico;.....	157
Figura 3.84 – a) Elenco di alcune tipologie di pavimenti architettonici create; b) Parametri del tipo della pavimentazione interna; c) Stratigrafia della pavimentazione interna.....	159
Figura 3.85 - a) Elenco di alcune tipologie di muri architettonici create; b) Parametri del tipo della muratura di tamponamento; c) Stratigrafia della muratura di tamponamento...	160
Figura 3.86 – Esempio di oggetti parametrici che è possibile scaricare dalla piattaforma web bimobject ( <a href="https://www.bimobject.com/it">https://www.bimobject.com/it</a> ). ....	161

Figura 3.87 – Elenco di alcuni oggetti parametrici utilizzati per la costruzione del modello architettonico dell’edificio: a) porte; b) finestre; c) componenti; d) componenti; d) ringhiere. ....	162
Figura 3.88 – Comandi presenti nella scheda costruisci di Revit 2021. ....	162
Figura 3.89 – Spaccato piano tipo del modello architettonico.....	163
Figura 3.90 – a) Comando “Collega Revit” della scheda Inserisci; b) Browser di progetto con l’indicazione del modello strutturale collegato. ....	164
Figura 3.91 - Spaccato piano tipo del modello architettonico e strutturale collegato.....	164
Figura 3.92 – Vista assonometrica frontale del modello architettonico completo. ....	165
Figura 3.93 – Vista assonometrica posteriore del modello architettonico completo. ....	165
Figura 3.94 – a) Pianta piano tipo; b) Legenda locali; c) Dettaglio costruttivo; d) Sezione 1-1;.....	166
Figura 3.95 – a) Abaco superfici dei locali; b) Abaco dei materiali muro. ....	167
Figura 3.96 – a) Comando per il controllo delle interferenze; b) Interfaccia per la selezione del progetto e delle categorie di elementi su cui fare il controllo. ....	168
Figura 3.97 – Rapporto delle interferenze rilevate tra gli elementi del modello architettonico.....	169
Figura 3.98 – Modelli architettonico e strutturale collegati al modello idraulico.....	170
Figura 3.99 – Gruppo comandi per la modellazione degli impianti idrici di Revit 2021. .	170
Figura 3.100 – a) Vista 3D del progetto idraulico di un bagno; b) Vista 3D del progetto idraulico su più piani; c) Particolare delle connessioni alla centralina; d) Vista 3D solo progetto idraulico senza file collegati. ....	171
Figura 3.101 – Controllo interferenze tra il modello idraulico e le altre discipline.....	172
Figura 3.102 – a) Struttura di selezione del caso studio su Navisworks Manage 2021; b) Percorso di appartenenza barra di armatura; c) Percorso di appartenenza piatto doccia; ..	174
Figura 3.103 – Vista 1 del modello federato su Navisworks Manage 2021. ....	175
Figura 3.104 – Vista 2 del modello federato su Navisworks Manage 2021. ....	175
Figura 3.105 – Menu impostazioni Clash Detective di Navisworks 2021.....	176
Figura 3.106 – Vista di una clash individuata con Navisworks 2021, relativa alle armature modellate con due diversi software Revit 2021 e Jasp 7.5. ....	177
Figura 3.107 – a) Libreria materiali di Enscape; b) Libreria Asset di Enscape. ....	178
Figura 3.108 – Vista esterna 1.....	179
Figura 3.109 – Vista esterna 2.....	179
Figura 3.110 – Vista esterna 3.....	179



Figura 3.111 – Vista esterna 4.....	180
Figura 3.112 – Vista interna: camera da letto. ....	180
Figura 3.113 – Vista interna: ingresso soggiorno. ....	180
Figura 3.114 – Vista interna: cucina. ....	181
Figura 3.115 – Vista interna: bagno doccia.....	181
Figura 3.116 – Vista interna: cameretta. ....	181
Figura 3.117 – Vista struttura 1.....	182
Figura 3.118 – Vista struttura 2.....	182
Figura 3.119 – Vista struttura 3.....	182

## INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1 – Definizione LOD secondo i diversi standard nazionali e internazionali (Fonte: 4 <sup>m</sup> group).....	18
Tabella 2 – Database delle specifiche IFC (https://technical.buildingsmart.org/standards/ifc/ifc-schema-specifications/?sfw=pass1668197042 – accesso il 23/09/2023).....	48
Tabella 3 - MVD Database table (https://technical.buildingsmart.org/standards/ifc/mvd/mvd-database/ - accesso il 23/09/2023). ....	52
Tabella 4 - Articoli di ricerca analizzati da Somaini J., 2021. ....	58
Tabella 5 - Punteggi di interoperabilità ottenuti, per ogni categoria di elemento, nel gap di 5 anni (Muller et al., 2017). ....	61
Tabella 6 - Risultati dei test di trasferimento dati per la struttura in c.a. proposta (Aldegeily M., 2018).....	69
Tabella 7 – Modalità di trasferimento possibili tra i software utilizzati nell’analisi (Beirnaert et Lippens, 2018). ....	70
Tabella 8 - Legenda per la lettura dei risultati (Beirnaert et Lippens, 2018). ....	70
Tabella 9 – Risultati di trasferimento dati, ottenuti nei test con Robot (Beirnaert et Lippens, 2018). ....	71
Tabella 10 - Compiti per diverse attività nella mappa dei processi (PM) per la progettazione strutturale (Lai et al., 2019).....	73
Tabella 11 - Specifiche del processo nella progettazione strutturale dettagliata (Lai et al., 2019). ....	73
Tabella 12 - Esempio di matrice ER per il trasferimento di informazioni nella progettazione strutturale. Legenda: (R) informazioni richieste; (O) informazioni facoltative; (-) non si ha attributo corrispondente; (Lai et al., 2019). ....	74
Tabella 13 - Definizioni degli oggetti richiesti nella matrice ER per la generazione del file di interscambio IFC (Lai et al., 2019).....	76
Tabella 14 - Definizioni degli attributi richiesti nella matrice ER per la generazione del file di interscambio IFC (Lai et al., 2019).....	76
Tabella 15 - Oggetti richiesti in diversi modelli di scambio durante la consegna delle informazioni di progettazione strutturale (Lai et al., 2019). ....	79
Tabella 16 – Problemi e possibili soluzioni agli errori di trasferimento riscontrati (Birkemo et al., 2019).....	82

Tabella 17 – Problemi riscontrati nell’importazione al software di analisi strutturale (Sibenik et Kovacic, 2020). .....	86
Tabella 18 – Riepilogo prestazioni di interoperabilità per tipo di elemento (Sibenik et Kovacic, 2020). .....	86
Tabella 19 - MVD CV V2.0 richiesti da buildingSMART (Sibenik et Kovacic, 2020). .....	87
Tabella 20 - MVD CV V2.0 presenti nei software. NOTE: Alcune geometrie nel processo di certificazione non possono essere create all'interno di alcuni software; tuttavia, queste geometrie non sono presenti negli elementi del caso studio proposto. (Sibenik et Kovacic, 2020). .....	88
Tabella 21 - Comportamento dei “concept” nei software di analisi strutturale (Sibenik et Kovacic, 2020). .....	88
Tabella 22 - Problemi identificati e strategie di miglioramento proposte che influenzano l'esperienza dell'utilizzatore finale durante lo scambio di dati (Sibenik et Kovacic, 2020). .....	90
Tabella 23 – Risultati di interoperabilità ottenuti nei test (Atia K. A, 2021). .....	92
Tabella 24 – Certificazioni IFC di Revit ( <a href="https://www.buildingsmart.org/compliance/software-certification/certified-software/">https://www.buildingsmart.org/compliance/software-certification/certified-software/</a> - ultimo aggiornamento del 27-07-2023). .....	129

## **RINGRAZIAMENTI**

Ringrazio il professore Piero Colajanni e la professoressa Laura Inzerillo per il supporto nella stesura di questo lavoro e per gli stimoli a sviluppare tematiche che mi hanno permesso di crescere professionalmente.

Ringrazio tutti i professori che ho incontrato durante il percorso accademico, per avermi trasmesso il loro sapere e la sete di conoscenza.

Ringrazio l'Ing. Francesco Acuto per il sostegno, anche morale, dato durante la redazione della tesi.

Dedico questo mio traguardo alla mia famiglia, che mi ha sempre sostenuto.

Ai miei genitori Lillo e Vita, per la loro dedizione che hanno donato a noi figli, e al loro esempio.

A mio nonno Salvatore, che anche se non è più con noi, ha sempre desiderato che diventassi un grande professionista. Spero di non deluderlo!

A mio fratello Vincenzo, mia sorella Valeria, mia cognata Laura e mia nonna Teresa: grazie per avere creduto in me ed avermi aiutato quando necessario.

Agli amici veri, tra cui non posso non menzionare Leoluca, che mi hanno sempre sostenuto, sopportato e che credono nelle mie capacità, anche più di me stesso.