



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile

Anno Accademico 2025/2026

Sessione di Laurea: marzo 2026

Dal modello informativo all'esperienza immersiva: validazione di un processo BIM-VR per la progettazione ospedaliera

Candidata:

Camilla Battisti

Relatrice:

Francesca Maria Ugliotti

Correlatore aziendale:

Stefano Carera

Indice

Indice	1
Indice delle immagini	3
Indice delle tabelle	9
Abstract.....	10
Introduzione	12
1. Stato dell'arte: BIM e tecnologie immersive	15
1.1. BIM	19
1.1.1. Definizione e principi del BIM	19
1.1.2. Quadro generale sullo sviluppo del BIM	23
1.1.3. Utilizzi del BIM in ambito sanitario	27
1.2. VR.....	35
1.2.1. Storia ed evoluzione delle tecnologie VR	35
1.2.2. Applicazione della VR nella progettazione.....	43
1.3. Integrazione tra BIM e VR.....	55
1.3.1. Applicazioni nella progettazione.....	55
1.3.2. BIM e VR nella revisione e presentazione del progetto.....	57
2. Struttura metodologica e contesto sperimentale	65
2.1. Caso studio: Ospedale di Cambiano.....	66
2.1.1. Inquadramento generale.....	68
2.1.2. Descrizione dell'intervento.....	79
2.1.3. Aree di progetto selezionate per l'analisi integrata.....	105
2.2. Workflow dal modello BIM all'interfaccia VR	112
2.2.1. Progettazione e modellazione	114
2.2.2. Individuazione e risoluzione delle interferenze.....	118
2.2.3. Presentazione del progetto tramite VR	123

3. Applicazione BIM-VR al caso studio.....	137
3.1. Clash Detection.....	138
3.1.1. Metodologia e risultati dell'analisi delle interferenze.....	138
3.1.2. Clash Detection sale operatorie	148
3.1.3. Clash Detection degenze	166
3.2. Presentazione immersiva del progetto	183
3.2.1. Metodologia e risultati della presentazione tramite VR.....	183
3.2.2. Scena interattiva sale operatorie	192
3.2.3. Scena interattiva degenze.....	201
Conclusioni.....	211
Bibliografia	217

Indice delle immagini

Figura 1 – Schema concettuale di come può essere rappresentato un muro in CAD 2D, in CAD 3D o in un modello BIM (Osello, 2012)	23
Figura 2 – Percentuali di professionisti che adottano il BIM nel 2025 e andamento dell'utilizzo del BIM nel corso degli anni (NBS, 2025)	24
Figura 3 – Andamento del numero di tutti i bandi BIM, 2015-2023 (OICE, 2024)	26
Figura 4 – Modellazione BIM della passerella dell'Ospedale di Cisanello (PI). In alto: modello architettonico prima (sinistra) e dopo (destra) l'intervento. In basso a sinistra: analisi del modello strutturale. In basso a destra: modellazione impiantistica (Mascia et al., 2020)	28
Figura 5 – Tecnologie emergenti che si interfacciano con il BIM (Tan et al., 2023)	30
Figura 6 – Dati richiesti per le metriche NHFBP per categoria (Choi et al., 2018)	31
Figura 7 – Dati richiesti da NHFBP per categoria e loro disponibilità per caso tipo (Choi et al., 2018)	32
Figura 8 – Metriche di benchmarking ospedaliero misurabili mediante BIM (Choi et al., 2018)	32
Figura 9 – Sezione di un esempio di panorama (Lescop, 2017)	37
Figura 10 – Rappresentazione della Telesphere Mask di Morton Heilig nel 1960 (Lescop, 2017)	38
Figura 11 – Differenze tra VR, AR e MR (Applied Art & Technology, 2017)	41
Figura 12 – Valutazioni dell'applicazione di AR e VR nei vari casi d'uso (Delgado et al., 2020)	46
Figura 13 – Istantanee dell'interfaccia dell'applicazione VR (Rokoei et al., 2023)	50
Figura 14 – Risposte dei partecipanti al sondaggio (Rokoei et al., 2023)	51
Figura 15 – Esempio di interfaccia VR applicata alla gestione del cantiere (LuminousXR)	53
Figura 16 – Aerofotogrammetrico, area di intervento (Tecnicaer Engineering S.r.l.)	66
Figura 17 – Aerofotogrammetrico – analisi area vasta (Tecnicaer Engineering S.r.l.)	67

Figura 18 – Suddivisione delle aree presenti nel lotto di interesse	69
Figura 19 – Stralcio della tavola di azionamento e viabilità (Tavola 4b – variante strutturale n. 2 al PRGC)	70
Figura 20 – Legenda tavola 4b (Variante strutturale n.2 al PRGC)	71
Figura 21 – Stralcio della carta dei vincoli (Tavola 10 – Variante Strutturale n. 2 al PRGC)	73
Figura 22 – Render del nuovo ospedale inserito nel contesto (Tecnicaer Engineering S.r.l.)	77
Figura 23 – Vista frontale dell’ingresso principale (Tecnicaer Engineering S.r.l.)	77
Figura 24 – Schema organizzativo e funzionale del nuovo ospedale (Tecnicaer Engineering S.r.l.)	78
Figura 25 – Sezione tipologica del nuovo ospedale (Tecnicaer Engineering S.r.l.)	79
Figura 26 – Masterplan del progetto (Tecnicaer Engineering S.r.l.)	81
Figura 27 – Strategia paesaggistica (Tecnicaer Engineering S.r.l.)	81
Figura 28 – Percorsi, accessi e parcheggi al piano terra (Tecnicaer Engineering S.r.l.)	82
Figura 29 – Percorsi, accessi e parcheggi al piano interrato (Tecnicaer Engineering S.r.l.)	83
Figura 30 – Quinte in treillage (Tecnicaer Engineering S.r.l.)	85
Figura 31 – Dettaglio della facciata continua (Tecnicaer Engineering S.r.l.)	86
Figura 32 – Vista interna della camera di degenza (Tecnicaer Engineering S.r.l.)	88
Figura 33 – Distribuzione funzionale piano interrato (Tecnicaer Engineering S.r.l.)	92
Figura 34 – Distribuzione funzionale piano terra (Tecnicaer Engineering S.r.l.)	92
Figura 35 – Distribuzione funzionale piano primo (Tecnicaer Engineering S.r.l.)	93
Figura 36 – Distribuzione funzionale piano secondo (Tecnicaer Engineering S.r.l.)	94
Figura 37 – Distribuzione funzionale piano terzo (Tecnicaer Engineering S.r.l.)	95
Figura 38 – Distribuzione funzionale piano quarto e quinto (Tecnicaer Engineering S.r.l.)	95

Figura 39 – Vista tridimensionale del modello strutturale dell’ospedale (Tecnicaer Engineering S.r.l.)	98
Figura 40 – Vista dall’altro del modello strutturale dell’ospedale (Tecnicaer Engineering S.r.l.)	98
Figura 41 – Dotazioni impiantistiche meccaniche (Tecnicaer Engineering S.r.l.)	103
Figura 42 – Pianta del blocco operatorio al PI (Tecnicaer Engineering S.r.l.)	106
Figura 43 – Spaccato architettonico assonometrico di una sala operatoria (Tecnicaer Engineering S.r.l.)	107
Figura 44 – Spaccato impiantistico assonometrico di una sala operatoria (Tecnicaer Engineering S.r.l.)	108
Figura 45 – Vista della sala operatoria (Tecnicaer Engineering S.r.l.)	109
Figura 46 – Blocco degenze: dettaglio involucro esterno (Tecnicaer Engineering S.r.l.)	110
Figura 47 – Pianta quinto piano (Tecnicaer Engineering S.r.l.)	110
Figura 48 – Spaccato architettonico assonometrico di degenze doppie (Tecnicaer Engineering S.r.l.)	111
Figura 49 – Spaccato impiantistico assonometrico di degenze doppie (Tecnicaer Engineering S.r.l.)	112
Figura 50 – Schema sulla metodologia del processo BIM-VR sviluppato e applicato al caso studio	113
Figura 51 – Interfaccia VR del software VRex	119
Figura 52 – Interfaccia del BCF Manager sul software Autodesk Revit	121
Figura 53 – Assegnazione materiali e proprietà ad elementi architettonici del blocco operatorio in Blender	125
Figura 54 – Modifica dei materiali e delle proprietà di un modello di tavolo operatorio in Blender	126
Figura 55 – Definizione del VR Player sull’interfaccia di Unity	129
Figura 56 – Rendering di parte delle scene immersive e interattive realizzare con Unity (in alto: sala operatoria di emergenza, in basso: camera di degenza con due posti letto)	136

Figura 57 – Visualizzazione dei modelli disciplinari collegati in VRex.....	139
Figura 58 – Compilazione del titolo di una “issue” del file BCF nell’ambiente immersivo di VRex	141
Figura 59 – Strumenti interattivi per la revisione del progetto in VRex	143
Figura 60 – Identificazione e risoluzione delle interferenze su Revit attraverso BCF Manager.....	145
Figura 61 – Vista VR della concentrazione di impianti all’interno di un controsoffitto (VRex)	147
Figura 62 – Immagine catturata nell’ambiente virtuale di VRex dell’Interferenza 01 del blocco operatorio.....	153
Figura 63 – Localizzazione dell’interferenza 01 all’interno del blocco operatorio del P1..	154
Figura 64 – Sezioni e viste 3D prima e dopo la correzione dell’interferenza 01 (sale operatorie)	156
Figura 65 – Localizzazione dell’interferenza 02 all’interno del blocco operatorio del P1.	158
Figura 66 – Immagine catturata nell’ambiente virtuale di VRex dell’Interferenza 02 del blocco operatorio.....	158
Figura 67 – Planimetrie e viste 3D prima e dopo la correzione dell’interferenza 02 (sale operatorie)	160
Figura 68 – Localizzazione dell’interferenza 03 all’interno del blocco operatorio del P1.	162
Figura 69 – Immagine catturata nell’ambiente virtuale di VRex dell’Interferenza 03 del blocco operatorio.....	162
Figura 70 – Planimetrie e viste 3D prima e dopo la correzione dell’interferenza 03 (sale operatorie)	164
Figura 72 – Immagine catturata nell’ambiente virtuale di VRex dell’Interferenza 01 del reparto di degenza.....	172
Figura 71 – Localizzazione dell’interferenza 01 all’interno del reparto di degenza del P5.	172
Figura 73 – Viste 3D prima e dopo la correzione dell’interferenza 01 (degenze)	174
Figura 74 – Immagine catturata nell’ambiente virtuale di VRex dell’Interferenza 02 del reparto di degenza.....	174

Figura 75 - Localizzazione dell'interferenza 02 all'interno del reparto di degenza del P5	175
Figura 76 - Planimetrie prima e dopo la correzione dell'interferenza 02 (degenze)	177
Figura 77 - Viste 3D prima e dopo la correzione dell'interferenza 02 (degenze)	178
Figura 78 - Immagine catturata nell'ambiente virtuale di VRex dell'Interferenza 03 del reparto di degenza.....	180
Figura 79 - Localizzazione dell'interferenza 03 all'interno del reparto di degenza del P5	181
Figura 80 - Viste 3D prima e dopo la correzione dell'interferenza 03 (degenze)	182
Figura 81 - Diverse tipologie di interazioni con elementi nella scena delle sale operatorie	186
Figura 82 - Visualizzazione del puntatore per il teletrasporto all'interno dell'ambiente virtuale.....	187
Figura 83 - Visuale di una camera di degenza doppia dal punto di vista di un paziente	189
Figura 84 - Interfaccia di modifica e progettazione degli ambienti virtuali	190
Figura 85 - Planimetria della parte del blocco operatorio presente nella scena interattiva	194
Figura 86 - Vista immersiva in prima persona di un medico con bisturi durante l'esplorazione VR della sala operatoria di emergenza	196
Figura 87 - Vista immersiva in prima persona di un medico seduto e pronto all'intervento durante l'esplorazione VR della sala operatoria di emergenza.....	197
Figura 88 - Vista immersiva in prima persona della sala operatoria ibrida dal locale di controllo durante l'esplorazione VR della sala operatoria di emergenza.....	197
Figura 89 - Vista immersiva in prima persona del locale di preparazione pre-intervento	199
Figura 90 - Visuale dal punto di vista di un infermiere della postazione di lavoro e controllo	200
Figura 91 - Visuale dal punto di vista di un infermiere del trasporto di un paziente sul lettino verso la sala operatoria	200

Figura 92 - Planimetria della parte del reparto di degenza presente nella scena interattiva.....	202
Figura 93 - Vista immersiva in prima persona della stanza di degenza singola.....	205
Figura 94 - Vista immersiva in prima persona della stanza di degenza doppia.....	205
Figura 95 - Vista immersiva in prima persona dei servizi igienici e verifica della loro accessibilità.....	206
Figura 96 - Vista immersiva in prima persona dello spazio di lavoro degli infermieri...	208
Figura 97 - Vista immersiva in prima persona del soggiorno/area svago dedicata ai pazienti del reparto.....	209
Figura 98 - Vista immersiva in prima persona dell'ambulatorio	209
Figura 99 - Vista immersiva in prima persona della zona di accettazione e accesso al reparto.....	210
Figura 100 - Differenza di visualizzazione tra le interfacce di VRex (sinistra) e delle scene interattive sviluppate (destra)	213

Indice delle tabelle

Tabella 1 – Evoluzione dei bandi BIM nei servizi di architettura e ingegneria (S.A.I.) – 2021-2024 (OICE, 2025)	25
Tabella 2 – Potenze impianti meccanici (Tecnicaer Engineering S.r.l.)	101
Tabella 3 – Sintesi dei risultati dell'analisi energetica (Tecnicaer Engineering S.r.l.).....	102
Tabella 4 – Suddivisione del progetto nei vari modelli per disciplina (Tecnicaer Engineering S.r.l.)	104
Tabella 5 – Suddivisione della modellazione del Nuovo Ospedale ASL TO 5	115
Tabella 6 – Elenco di interferenze trovate attraverso la clash detection immersiva nel blocco operatorio.....	150
Tabella 7 – Elenco di interferenze trovate attraverso la clash detection immersiva nel reparto di degenza.....	168

Abstract

Il settore delle costruzioni è sempre alla ricerca di tecnologie innovative per potenziare la progettazione tradizionale. Questo studio ha l'obiettivo di analizzare come l'integrazione tra metodologia BIM e interfacce di realtà virtuale possa essere implementata nel processo edilizio. Il caso studio è il Nuovo Ospedale ASL TO 5 di Cambiano (TO), in fase di Progetto di Fattibilità Tecnico Economica.

La metodologia proposta si fonda su un workflow integrato BIM–VR che prevede la modellazione multidisciplinare del complesso e l'esecuzione dell'analisi delle interferenze (clash detection) in ambiente immersivo. L'utilizzo della realtà virtuale semplifica l'individuazione e la risoluzione delle criticità tra le diverse componenti progettuali. Il modello corretto e validato viene quindi ottimizzato per la visualizzazione interattiva e lo sviluppo di scene immersive a supporto della progettazione partecipata. La sperimentazione, applicata al blocco operatorio e al reparto di degenza, ha permesso di valutare il processo sia dal punto di vista tecnico sia in termini di esperienza utente. L'interfaccia VR consente l'interazione con gli oggetti e la modifica del layout, favorendo l'analisi di soluzioni alternative e la verifica funzionale degli spazi.

I risultati evidenziano l'efficacia della realtà virtuale nel supportare la progettazione sanitaria. L'osservazione immersiva e in scala reale del modello permette di valutare consapevolmente le criticità e di individuare la soluzione più adeguata per i diversi ambiti coinvolti. Persistono tuttavia limiti di interoperabilità e standardizzazione, oltre alla necessità di competenze avanzate, che rendono auspicabile lo sviluppo di piattaforme BIM–VR già integrate che semplifichino i processi e riducano le tempistiche operative.

English version

The construction industry is constantly seeking innovative technologies to enhance traditional design practices. This study aims to analyze how the integration of BIM methodology and virtual reality interfaces can be implemented within the building process. The case study concerns the New ASL TO5 Hospital in Cambiano (Turin).

The proposed methodology is based on an integrated BIM–VR workflow involving multidisciplinary modeling of the complex and immersive clash detection. The use of virtual reality facilitates the identification and resolution of conflicts among the different design components. The validated model is then optimized for interactive visualization and the development of immersive scenes supporting participatory design. The experimentation, applied to the operating block and inpatient ward, enabled the evaluation of the process from both a technical perspective and in terms of user experience. The VR interface allows object interaction and layout modification, supporting the analysis of alternative solutions and the functional verification of spaces. The results highlight the effectiveness of virtual reality in supporting healthcare design. Immersive, full-scale observation of the model enables informed assessment of critical issues and identification of the most appropriate solutions for the various stakeholders involved. However, limitations related to interoperability and standardization persist, along with the need for advanced expertise, highlighting the desirability of fully integrated BIM–VR platforms capable of simplifying processes and reducing timeframes.

Introduzione

I recenti progressi tecnologici nella visualizzazione, nell'analisi e nella gestione della progettazione hanno aiutato i professionisti e i ricercatori del settore delle costruzioni a compiere passi concreti verso il miglioramento della qualità e dell'efficienza dell'intero processo edilizio. In questo campo sono coinvolti molteplici stakeholder che devono quotidianamente affrontare sviluppi ed elaborazioni ad alta intensità di dati. Questi ultimi devono essere coordinati e aggiornati durante l'intero ciclo di vita del progetto.

A causa delle pratiche poco sostenibili e della produttività in discesa, dagli anni 2000 in poi il settore edile è stato spinto ad adottare il Building Information Modeling (BIM), ovvero un processo intelligente che si basa su modelli e che fornisce informazioni e strumenti per pianificare, progettare, costruire e gestire edifici e infrastrutture in modo efficiente e strutturato. Nonostante questo strumento sia sempre più globalmente diffuso, esistono ancora importanti sfide riguardo il suo utilizzo, come le difficoltà di gestione, comunicazione e presentazione dei complessi database di informazioni e dettagli contenuti nelle piattaforme digitali. Inoltre, il BIM da solo risulta spesso insufficiente nel soddisfare l'esigenza di una piattaforma comune che consenta a tutti gli attori coinvolti di comunicare e scambiare dati e nozioni per raggiungere un processo decisionale collaborativo. In questo contesto, le interfacce di realtà virtuale possono essere un supporto utile ed efficiente, soprattutto in riferimento alle fasi di coordinamento multidisciplinare e di comunicazione del progetto. Le tecnologie immersive consentono di osservare in scala reale gli ambienti realizzati nel modello tramite un apposito visore, facilitando le operazioni di analisi delle interferenze e di gestione delle diverse componenti specialistiche. Un altro importante vantaggio di questi strumenti virtuali è la possibilità di presentare gli spazi anche a committenze prive di competenze tecniche e ingegneristiche. Infatti, immergendosi nell'ambiente digitale chiunque si può rendere conto delle dimensioni delle aree, della funzionalità dei layout e delle eventuali criticità di vivibilità dell'edificio.

La presente ricerca sperimentale si pone l'obiettivo di indagare le effettive potenzialità dell'integrazione di strumenti di realtà virtuale alla metodologia BIM nella progettazione in generale, e più nello specifico in quella sanitaria. Il processo BIM-VR sviluppato viene applicato ad un caso studio reale, ovvero il Progetto di Fattibilità Tecnico Economica del Nuovo Ospedale ASL TO 5 di Cambiano, in provincia di Torino (Piemonte, Italia).

La metodologia seguita si sviluppa a partire dalla progettazione del complesso sanitario, con la realizzazione di diversi modelli disciplinari, e dalla successiva ottimizzazione degli stessi per alleggerirne le dimensioni e consentirne l'esportazione. Il lavoro prosegue con l'individuazione delle interferenze tra le diverse componenti specialistiche tramite realtà virtuale, resa possibile dalla piattaforma collaborativa VRex, che consente ai team di professionisti di riunirsi in uno spazio immersivo condiviso per visualizzare modelli BIM, discutere questioni tecniche, effettuare revisioni di progetto e prendere decisioni consapevoli. Le criticità emerse dall'analisi vengono poi risolte e corrette prima di passare alla fase di creazione di scene immersive e interattive per la presentazione del progetto. Le geometrie validate dei modelli vengono esportate e caricate su un software di visualizzazione, come Blender, all'interno del quale è possibile assegnare proprietà e materiali ai vari elementi. Infine, vengono definite le impostazioni di interazione e di rappresentazione all'interno del motore grafico Unity, che permette la realizzazione di ambienti virtuali nei quali si riesce ad interagire e modificare le dimensioni e la posizione degli oggetti, degli arredi e degli elementi architettonici, strutturali e impiantistici. Questo tipo di esposizione del progetto permette l'analisi critica del layout degli spazi, l'osservazione di diverse soluzioni alternative e la ricezione di feedback mirati e consapevoli da parte del personale medico o dell'utenza dell'ospedale. Infatti, le scene realizzate riguardano sia il blocco operatorio che le camere di degenza dei ricoverati. In questo modo si riesce a sperimentare il processo BIM-VR per la valutazione dell'analisi delle criticità che possono interferire con il lavoro dei chirurghi e, allo stesso tempo, per la ricerca delle soluzioni progettuali più adeguate alla riabilitazione e guarigione dei pazienti.

Al fine di sviluppare in modo organico il tema oggetto di studio, l'elaborato è organizzato secondo una struttura progressiva che parte dall'inquadramento teorico per arrivare all'applicazione sperimentale e infine all'analisi dei risultati. Il primo capitolo riguarda lo stato dell'arte del BIM e delle tecnologie immersive di realtà virtuale, con un focus sulla loro applicazione nella progettazione, nel coordinamento e nella presentazione dell'opera. Successivamente si passa alla descrizione dettagliata del caso studio, sottolineandone l'inquadramento generale e la descrizione dell'intervento dal punto di vista della divisione degli spazi, delle scelte progettuali architettoniche, strutturali e impiantistiche, e delle soluzioni tecniche scelte. La presentazione dell'ospedale si conclude con un approfondimento delle aree del blocco operatorio e del reparto di degenze, selezionate per l'analisi integrata del processo BIM-VR. Il terzo capitolo è il vero

nucleo della ricerca e riguarda l'applicazione diretta della metodologia al caso studio. Questa sezione ha l'obiettivo di spiegare il workflow ideato per il passaggio dal modello BIM all'interfaccia interattiva di realtà virtuale, descrivendone in modo specifico e dettagliato ogni passaggio. Una volta definito il procedimento di lavoro si passa alla presentazione dei risultati ottenuti, sia per quanto riguarda l'analisi delle interferenze che per la visualizzazione immersiva degli ambienti dell'ospedale.

La tesi intende quindi fornire un contributo alla comprensione delle attuali possibilità operative offerte dall'integrazione tra ambienti BIM e strumenti immersivi, delineando al contempo possibili sviluppi futuri.

1. Stato dell'arte: BIM e tecnologie immersive

Negli ultimi anni il progresso e la digitalizzazione hanno trasformato radicalmente la progettazione e i processi di gestione nel settore edilizio e delle costruzioni. L'adozione del Building Information Modeling (BIM) e delle tecnologie immersive, come la realtà virtuale (VR), la realtà aumentata (AR) e la realtà mista (MR), ha aperto nuove possibilità e metodologie per affrontare la complessità dei progetti in generale e, in particolare, di quelli ospedalieri e sanitari. Tali edifici, infatti, sono caratterizzati da una fitta rete di impianti, funzioni tecniche, flussi di utenti e materiali che richiedono strumenti capaci di gestire informazioni multidisciplinari e, allo stesso tempo, di semplificare il dialogo tra progettisti, clinici, tecnici e stakeholder non esperti.

Ricerche e studi scientifici dimostrano come le tecnologie moderne siano molto più di semplici strumenti di rappresentazione; esse, infatti, costituiscono veri e propri supporti decisionali. Nello specifico, la realtà virtuale e le sue molteplici applicazioni immersive consentono di riprodurre ambienti complessi, facilitando così la valutazione funzionale e tecnica degli spazi da parte del personale medico e dei potenziali pazienti, che diventano partecipanti attivi del processo di progettazione.

Modificare l'ambiente fisico delle strutture ospedaliere può avere un impatto positivo sui risultati dei pazienti e sulla loro esperienza all'interno dell'edificio. La realtà virtuale offre la possibilità di comprendere come la progettazione dell'ambiente sanitario influenzi la percezione degli utenti, che possono immergersi in uno spazio simulato e rendersi conto delle funzionalità e dei comfort forniti in modo molto più chiaro rispetto alla sola osservazione di una pianta o una tavola, attività che può risultare difficile per persone senza conoscenze tecniche sulla progettazione o sull'edilizia.

La norma ISO 19650-1:2018¹ definisce il Building Information Modeling (BIM) come l'uso di una rappresentazione digitale condivisa di un bene costruito, finalizzata a supportare i processi di progettazione, costruzione e gestione dell'opera e a costruire una base affidabile per le decisioni progettuali. (ISO, 2018)

¹ ISO 19650-1:2018 – Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) – Information management using building information modelling – Part 1: Concepts and principles

In ambito operativo, il BIM si basa su un modello tridimensionale intelligente, supportato da una piattaforma cloud, che integra dati strutturati multidisciplinari per rappresentare digitalmente una costruzione durante tutto il suo ciclo vita, dalla pianificazione alla messa in funzione e gestione.

La realtà virtuale è invece una tecnologia immersiva che proietta l'utente in un luogo digitale tridimensionale tramite un apposito visore che nasconde completamente il mondo reale. Permette, quindi, di vivere esperienze in prima persona, abbattendo le barriere geografiche e simulando una qualsiasi ambientazione diversa dalla realtà. Durante l'utilizzo della realtà virtuale l'utente non ha più la percezione dell'ambiente in cui si trova, ma è completamente immerso nello spazio virtuale e digitale.

L'integrazione tra BIM e realtà virtuale costituisce una metodologia in grado di incidere in modo significativo sulla qualità dei progetti ospedalieri. Nel quadro teorico, il BIM fornisce l'infrastruttura informativa, ovvero un modello parametrico costituito dall'unione di geometrie e dati che supporta il coordinamento interdisciplinare, la tracciabilità delle decisioni, le simulazioni prestazionali, la computazione e, in fase di esercizio, la gestione e manutenzione dell'opera.

Le tecnologie VR si presentano come un'interfaccia cognitiva che permette il controllo e la verifica dei contenuti del modello in modo totalmente immersivo. In medicina sono stati registrati numerosi vantaggi, con solide basi empiriche, derivanti dall'utilizzo di tali tecnologie, tra cui emergono gli aspetti elencati di seguito.

- L'uso della realtà virtuale, in combinazione con i metadati BIM accessibili all'interno di un ambiente digitale, in base alle revisioni di progettazione sanitaria, rende più semplice la comprensione della concezione progettuale, migliora l'accuratezza del progetto e riduce i tempi di completamento e raggiungimento degli obiettivi finali per il personale clinico e la committenza.
- Nei processi evidence-based, la configurazione ambientale in fase di progettazione tramite realtà virtuale fornisce uno strumento importante al personale clinico, ai pazienti e agli utenti per comprendere in modo più efficace la suddivisione degli spazi, evitando così la realizzazione di mock-up fisici e risparmiando su costi e tempi.

Nel contesto della progettazione ospedaliera, il termine "evidence-based" si riferisce a un approccio metodologico che contribuisce a prendere decisioni di progettazione basate su prove di tipo scientifico, dati misurabili, esperienze documentate e feedback raccolti da personale e pazienti reali. Si tratta di un'estensione dei principi dell'"Evidence-Based Medicine" (EBM) applicata all'architettura e prende il nome di "Evidence-Based

Design" (EBD). Questo concetto è stato definito da Ulrich e Zimring, due autori chiave del settore, come: *"un processo decisionale formale nel quale le scelte progettuali sono basate sulle migliori evidenze disponibili riguardanti gli effetti dell'ambiente costruito su pazienti, personale e risultati clinici"*. (Ulrich et al., 2008; Zimring et al., 2010).

Tradizionalmente, tali processi si concretizzavano attraverso mock-up fisici, ovvero rappresentazioni in scala reale che permettevano al personale clinico di simulare flussi e procedure all'interno degli spazi prima della loro realizzazione effettiva. Sebbene molto efficace questo tipo di soluzione presenta costi molto elevati e scarsa flessibilità. Per questo nella pratica contemporanea vengono sempre più affiancati o sostituiti completamente da ambienti virtuali immersivi basati su modelli BIM, che consentono una valutazione multidisciplinare più rapida, economica e iterativa.

Per quanto riguarda la fase di progettazione che concerne il coordinamento tra le discipline architettonica, strutturale e impiantistica, la realtà virtuale potenzia i flussi BIM per la clash detection, ovvero l'identificazione delle interferenze geometriche e funzionali tra gli elementi e i modelli delle diverse discipline, e la risoluzione collaborativa dei conflitti. Piattaforme e software dedicati, come VRex, permettono di importare file in formati aperti direttamente da Revit o altri programmi, navigarli in scala 1:1, compilare parametri di elementi e condurre riunioni tecniche multiutente direttamente all'interno dello spazio virtuale, riducendo la separazione tra documenti e percezione spaziale e migliorando i cicli di revisione. La letteratura negli anni ha confermato il contributo dell'adozione di questi strumenti a supporto della comunicazione interdisciplinare e del contenimento degli errori tipici nella relazione tra impianti, strutture e architettura.

In ambito sanitario l'integrazione tra modellazione informativa e realtà virtuale ha dimostrato la propria efficacia in molteplici fasi della progettazione. Le simulazioni immersive realizzate finora sono state applicate con successo sia a reparti e blocchi operatori, per verificarne la disposizione degli spazi, il corretto posizionamento delle attrezzature, la percorribilità e l'ergonomia per il personale, sia ad aree di degenza e riabilitazione, dove permettono di controllare percezione, comfort e qualità ambientale dal punto di vista dell'utenza finale. La possibilità di trasferire il modello digitale all'interno di un ambiente virtuale permette, infatti, di mantenere i contenuti tecnici del progetto e di verificare con precisione parametri come dimensioni, illuminazione, colori, distanze operative e ingombri. Questa possibilità rende la valutazione delle varie alternative più affidabile e supporta decisioni progettuali decisamente più consapevoli.

La capacità di restituire lo spazio in modo immediato e immersivo è fondamentale anche nella fase successiva alla progettazione, ovvero la presentazione e promozione del progetto, in cui la realtà virtuale diventa uno strumento decisivo per coinvolgere la committenza e rendere comprensibili anche le soluzioni più complesse. La letteratura evidenzia come il coinvolgimento consapevole degli stakeholder e del personale non tecnico dell'ente richiedente contribuisca a ridurre le incomprensioni tipiche della comunicazione bidimensionale e a fornire una validazione più chiara e informata delle scelte progettuali, un aspetto particolarmente rilevante negli edifici ad alta densità impiantistica come gli ospedali.

Oltre alla realtà virtuale, per quanto riguarda la presentazione del progetto e degli elaborati grafici di supporto, emergono gli strumenti olografici come potenziale evoluzione della rappresentazione tridimensionale. Un sistema olografico può proiettare fisicamente modelli digitali in scala reale, permettendo a più persone di osservare i dettagli tecnici, come gli elementi impiantistici, strutturali o architettonici, così come le relazioni spaziali tra di essi, senza dover ricorrere esclusivamente a schermi o visori individuali. L'olografia applicata nel settore delle costruzioni, come molte ricerche hanno confermato, è in grado di sostituire i tradizionali disegni bidimensionali, aggiungendo alla rappresentazione informazioni di progetto condivise e interattive. Questo approccio rende più semplice e intuitiva la comprensione per le parti interessate. In un contesto sanitario, ciò significa che la committenza, il personale medico e i tecnici possono visualizzare con immediatezza la sovrapposizione di impianti, travi o strutture nei reparti, interrogare i componenti, evidenziare percorsi critici e comprendere le implicazioni delle scelte progettuali con maggiore efficacia rispetto alla rappresentazione bidimensionale o persino alla tradizionale vista 3D su schermo. Un articolo sull'industria AEC² evidenzia come le tecnologie volumetriche e olografiche "possono ridurre il divario tra modello BIM e realizzazione, migliorando la collaborazione" (Hamzeh et al., 2019).

Nel loro insieme i contributi analizzati mostrano come la progressiva interoperabilità tra modellazione informativa, tecnologie immersive e strumenti olografici stia aiutando a ridefinire l'intero processo di concezione, valutazione e comunicazione dei progetti complessi, con un impatto importante nel settore sanitario e ospedaliero. La combinazione di BIM, realtà virtuale e visualizzazione volumetrica rappresenta, oltre ad un cambiamento tecnologico, anche un'importante rivoluzione metodologica, grazie

² L'acronimo AEC significa "Architecture, Engineering and Construction", e viene utilizzato per indicare l'industria della progettazione, ingegneria e costruzione.

alla quale la progettazione diventa un processo consapevole, trasparente e basato su dati e informazioni verificabili. Contemporaneamente, grazie a questa nuova ottica progettuale, le esperienze immersive arricchiscono la comprensione degli spazi e semplificano la collaborazione e la comunicazione, portando ad un'importante riduzione degli errori. Anche la presentazione delle soluzioni tecniche viene implementata, riuscendo a coinvolgere soggetti privi di competenze specialistiche.

Alla luce di queste premesse, il capitolo prosegue approfondendo il ruolo del Building Information Modeling in ambito sanitario, analizzandone nello specifico principi, usi e potenzialità nei progetti ospedalieri. Successivamente verranno esaminati gli sviluppi più recenti della realtà virtuale applicata alla progettazione e, infine, i principali modelli di integrazione BIM e ambiente immersivo.

Questo percorso consentirà di delineare un quadro coerente della letteratura e di evidenziare le basi teoriche e operative che informano l'applicazione delle tecnologie digitali nel caso studio oggetto della tesi.

1.1. BIM

1.1.1. Definizione e principi del BIM

Il Building Information Modeling affonda le sue radici negli anni Ottanta, quando si cominciò a superare l'idea del disegno digitale come semplice trasposizione delle geometrie e informazioni tecniche tradizionali. La progressiva evoluzione del software di rappresentazione parametrica, come il CAD, introdusse con il tempo la possibilità di rappresentare edifici come sistemi composti da oggetti dotati di proprietà e relazioni, anziché come anonimi insiemi di linee. La letteratura dedicata all'evoluzione del disegno digitale ha permesso di ricostruire il passaggio ancora successivo, ovvero quello di considerare il modello dell'opera reale non soltanto come documento grafico, ma come contenitore informativo, capace di integrare dati geometrici, prestazionali, temporali ed economici.

Agli inizi degli anni Duemila il settore delle costruzioni ha assistito alla diffusione sempre maggiore del BIM e la sua adozione si è lentamente estesa da progetti pilota e infrastrutturali verso l'edilizia civile. Questo passaggio è stato possibile anche grazie alle esperienze maturate nella progettazione industriale e manifatturiera di quei tempi, dove già era diffuso l'utilizzo di modelli digitali capaci di rappresentarne l'intero ciclo vita di

alcuni prodotti di fabbrica. Tali innovazioni hanno suscitato nuove aspirazioni nel settore delle costruzioni. Infatti, osservando lo sviluppo industriale, si è capito come la digitalizzazione non fosse limitata al disegno, ma potesse unirsi ed essere implementata dal processo di gestione e informativo della progettazione. In questa ottica, il BIM ha progressivamente assunto il ruolo di modello collaborativo e multidisciplinare, che non si limita alla rappresentazione tridimensionale dell'edificio, ma integra dati, processi e fattori lungo l'intero processo di realizzazione, gestione e manutenzione dell'opera.

La modellazione digitale è quindi passata da una essenziale trasposizione geometrica tridimensionale ad un database di parametri associati ad ogni elemento dell'edificio. Questi componenti possono essere di diversi tipi, come ad esempio informazioni su proprietà fisiche o chimiche, materiali, costi, manutenzione e sostenibilità. Il BIM si è basato su questo principio per evolversi in un sistema di gestione dei dati che è sicuramente molto più che un semplice strumento grafico. Il modello federato BIM³ ha permesso una collaborazione in ambienti integrati tra ingegneri strutturali, impiantisti, architetti e operatori di cantiere, limitando gli errori di coordinamento tra discipline e favorendo la comunicazione. Con la crescente diffusione di questo tipo di modellazione si è iniziato a parlare delle "dimensioni del BIM", ovvero aree tematiche raggiunte e potenziate da questo nuovo metodo di progettazione, ciascuna delle quali estende il potenziale informativo del modello verso nuove funzioni operative.

L'introduzione della quarta dimensione (4D), ha aggiunto al modello geometrico e informativo tridimensionale la variabile del tempo, permettendo il collegamento di ogni elemento ad una fase del cronoprogramma. Secondo il testo "BIM Handbook" pubblicato nel 2018, questa evoluzione ha reso possibile la simulazione dello stato di cantiere in fasi differenti, l'analisi delle sequenze costruttive alternative e l'individuazione delle criticità ancora prima che si manifestino in fase esecutiva (Eastman et al., 2018).

La successiva estensione al 5D ha permesso di associare ai componenti del modello computi metrici, costi unitari, analisi economiche e simulazioni di budget, integrando così la dimensione economica. In questo modo, il BIM diventa uno strumento di cost management dinamico: ogni modifica comporta un aggiornamento automatico del computo e della previsione economica. Questo meccanismo migliora sicuramente

³ Un modello federato BIM è l'unione di più modelli disciplinari sviluppati in modo indipendente, che vengono aggregati in un unico contenitore virtuale per permettere il coordinamento, la verifica delle eventuali interferenze e la gestione integrata delle informazioni, senza doverli necessariamente fondere in un unico file nativo.

l'accuratezza delle stime, limita sensibilmente il rischio di divergenze tra i costi previsti e quelli reali e riduce le tempistiche di computazione.

Le ulteriori estensioni del modello informativo, spesso indicate come 6D e 7D, riguardano rispettivamente le prestazioni energetiche e ambientali dell'edificio e la gestione e manutenzione dell'opera durante tutto il suo ciclo di vita. In questa fase, grazie al BIM, vengono integrati nel modello dati come parametri energetici, termici e illuminotecnici e, allo stesso tempo, informazioni sulla manutenzione (schede ergotecniche o manuali di utilizzo) e protocolli di sostenibilità e certificazione, quali LEED, BREEAM o Itaca⁴.

In uno studio condotto sui modelli informativi applicati alla progettazione ospedaliera è stato dimostrato come l'utilizzo del BIM in fase di esercizio supporti decisioni strategiche legate alla manutenzione, ottimizzando l'uso delle risorse e aumentando la qualità del servizio offerto (Wanigarathna et al., 2019).

Nonostante le dimensioni fino alla settima siano quelle maggiormente riconosciute e adottate quotidianamente negli studi di ingegneria e architettura, la letteratura suggerisce che il potenziale del BIM potrebbe spingersi ben oltre. Qualsiasi nuova estensione operativa può essere interpretata come una potenziale applicazione del modello informativo, dalla sicurezza in cantiere ai criteri di sostenibilità, dalla gestione del rischio fino all'integrazione con piattaforme IoT⁵ e sistemi di analisi avanzata. Questa grande versatilità del BIM lo rende capace di interagire con ambienti software differenti, aprendo scenari applicativi molto ampi.

Nella pratica professionale si tende a far riferimento principalmente alle dimensioni sopracitate, considerate lo standard per la progettazione e la gestione del ciclo vita delle opere edilizie.

A seguito dell'introduzione delle dimensioni dalla quarta alla settima, il costante sviluppo della metodologia BIM è sfociato nella definizione del Digital Twin, considerato da molti

⁴ I protocolli LEED, BREEAM e Itaca sono sistemi di valutazione della sostenibilità degli edifici che valutano l'impatto ambientale di un progetto. LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) è sviluppato dall'U.S. Green Building Council (USGBC) e tiene conto della sostenibilità del sito, dell'efficienza idrica ed energetica, della gestione dei materiali e della qualità ambientale interna. BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) valuta e certifica la performance ambientale degli immobili dalla fase di progettazione alla costruzione e all'utilizzo. Il protocollo Itaca è stato creato dall'Istituto per l'innovazione e la trasparenza degli appalti e la compatibilità ambientale (ITACA) e considera aspetti come consumi energetici, impatto sull'ambiente, uso di materiali eco-compatibili e qualità dell'abitazione.

⁵ L'IoT (Internet of Things) è una rete di oggetti fisici dotati di sensori, software e altre tecnologie che si connettono e scambiano dati su Internet.

la forma più avanzata e innovativa di rappresentazione di un edificio. Si tratta di una copia digitale dinamica e aggiornata in tempo reale di un'opera fisica. In questo caso si crea una bidirezionalità dei flussi informativi, poiché il modello contiene, oltre alle informazioni inserite manualmente o associate agli elementi geometrici, anche una serie di dati provenienti da sensori IoT, sistemi computerizzati, piattaforme di gestione e dispositivi di monitoraggio. Il Digital Twin consente di eseguire test strutturali o sismici virtuali, simulazioni di sicurezza e scenari di emergenza e allo stesso tempo di ottimizzare la gestione dei flussi e la manutenzione predittiva basata su dati in tempo reale. Come sottolineato da buildingSMART⁶ (2020), il Digital Twin rappresenta “il punto finale dell'evoluzione del BIM”, dove il modello non è più una rappresentazione statica, ma un organismo digitale in grado di adattarsi, prevedere e ottimizzare.

Viste le molteplici applicazioni del BIM, per comprenderne le varie applicazioni e sfaccettature è utile sottolineare che l'acronimo assume diversi significati:

- **Building Information Modeling:** come già introdotto, questa definizione si riferisce ad un metodo basato su un modello informativo dell'edificio che contiene qualsiasi tipo di dato relativo alla costruzione. Oltre ai contenuti geometrici tridimensionali basati su oggetti, vi sono informazioni quali specifiche dei materiali e degli elementi edilizi, dati economici e programmazioni (Eastman et al., 2018).
- **Building Information Model:** questo acronimo definisce la rappresentazione digitale delle caratteristiche fisiche e funzionali di un'opera o di una struttura. In quanto tale costituisce una risorsa condivisa di conoscenza che fornisce informazioni affidabili sull'edificio lungo tutto il suo ciclo di vita. (AIA California Council, 2007). Utilizzando questa espressione si intende fare riferimento direttamente al modello digitale piuttosto che alla metodologia di rappresentazione impiegata per la sua creazione e progettazione.
- **Beyond Information Models:** questa interpretazione sottolinea che il BIM non è un'applicazione software, bensì un sistema basato sull'informazione che genera valore nel lungo periodo e promuove l'innovazione. Rappresenta, infatti, un vero e proprio cambiamento evolutivo nel modo in cui l'uomo si relaziona con l'ambiente costruito (Jernigan, 2007).

⁶ buildingSMART è una comunità globale di capitoli, membri, partner e sponsor impegnata nella creazione e nello sviluppo di metodi di lavoro digitali e aperti per lo sviluppo dell'ambiente costruito.

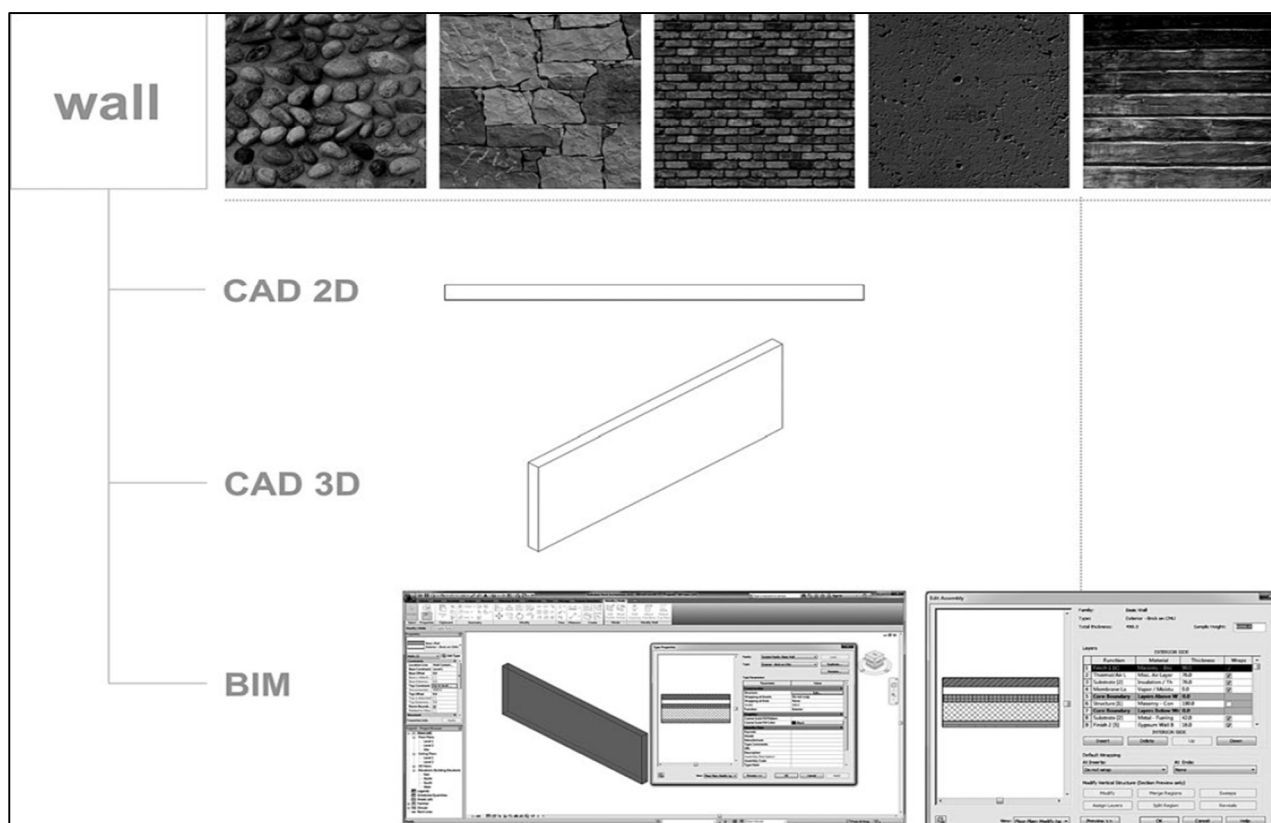


Figura 1 – Schema concettuale di come può essere rappresentato un muro in CAD 2D, in CAD 3D o in un modello BIM (Osello, 2012)

Tale distinzione evidenzia la dualità principale del BIM, che è ben più di una semplice rappresentazione digitale delle caratteristiche fisiche e funzionali di un'opera (*model*). Come attività (*modeling*), esso è costituito da processi applicati per la realizzazione, gestione e comunicazione di informazioni e dati tra soggetti a livelli differenti.

1.1.2. Quadro generale sullo sviluppo del BIM

Lo sviluppo del Building Information Modeling ha seguito un percorso graduale ma costante, caratterizzato da un'importante accelerazione negli ultimi dieci anni. Il report emesso da "NBS Digital Construction" nel 2015 mostra che il BIM quell'anno ha raggiunto un buon livello di successo e maturità, soprattutto su scala internazionale. Dopo quindici anni dall'inizio delle rilevazioni effettuate da NBS⁷, questo sistema di modellazione non è più percepito come innovazione emergente, ma come infrastruttura digitale necessaria

⁷ National Building Specification (NBS) è un'organizzazione con sede nel Regno Unito che sviluppa standard tecnici, specifiche e strumenti digitali per la progettazione. È uno tra gli enti più autorevoli a livello internazionale nel settore dei processi BIM e del design digitale.

su cui si sta costruendo l'evoluzione del settore AEC. Il report mostra che nel 2025 una significativa maggioranza di professionisti del settore edile (72,3%) afferma di aver adottato il BIM. Questo dato rappresenta un leggero aumento rispetto ai sondaggi del 2023 (70%) e del 2018 (71%). La tendenza degli ultimi anni dimostra che questa tecnologia è passata dalla fase di "adozione iniziale" a quella di accettazione generalizzata, con un ulteriore 15,7% di professionisti intervistati quest'anno che afferma di prevedere l'utilizzo del BIM in futuro. Nel campione analizzato da NBS, solo una minoranza associa il BIM esclusivamente al modello tridimensionale, mentre una parte molto significativa lo definisce come "migliore strategia e gestione informativa", "fondamento della trasformazione digitale" o "insieme di processi operativi allineati allo standard ISO 1950⁸". Questa pluralità di definizioni segnala uno sviluppo sociale e culturale che ha portato a sviluppare una sempre maggiore attenzione alla gestione e al controllo dei dati e della collaborazione digitale durante tutte le fasi di progettazione e realizzazione di un'opera edile.

La diffusione del BIM non ha un impatto puramente tecnologico, ma anche operativo e ambientale. Infatti, la quasi totalità dei professionisti coinvolti nel sondaggio di NBS nel 2025 riconosce miglioramenti concreti negli esiti dei progetti, evidenziando che le

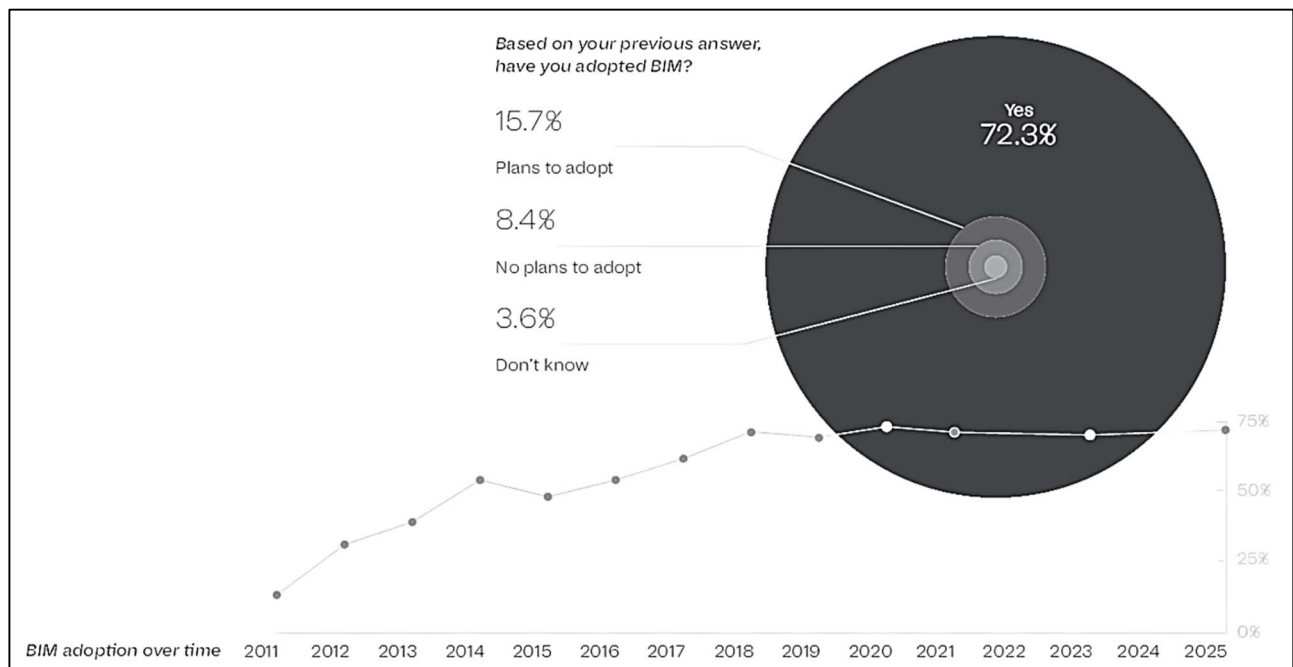


Figura 2 - Percentuali di professionisti che adottano il BIM nel 2025 e andamento dell'utilizzo del BIM nel corso degli anni (NBS, 2025)

⁸ ISO 19650: norma internazionale che definisce i processi per la gestione delle informazioni nei progetti di costruzione, dall'ideazione alla demolizione.

tecnologie digitali favoriscono la realizzazione di edifici più sicuri, efficienti e sostenibili dal punto di vista energetico e ambientale:

- 90,8% dichiara miglioramenti nella qualità degli edifici,
- 86,2% nelle prestazioni ambientali,
- 84,0% nella sicurezza operativa.

Questi numeri confermano che la digitalizzazione non viene più percepita come un costo, bensì come un investimento strategico che genera valore a lungo termine in tutte le fasi di progettazione, costruzione, manutenzione e gestione delle opere.

In Italia, l'evoluzione è stata più lenta. Le prime indagini svolte da OICE⁹ dimostrano che almeno fino al 2017 le gare pubbliche che richiedevano l'utilizzo del BIM erano meno dell'8%. A dicembre 2017 un decreto ministeriale (DM 560/2017) ha reso obbligatoria la sua adozione per gli appalti pubblici sopra determinate soglie economiche e ha sancito l'inizio della sua progressiva diffusione. L'analisi dei report OICE più recenti mostra come il BIM stia attraversando una fase di adozione disomogenea, condizionata in modo significativo dagli andamenti del mercato dei servizi di ingegneria e dalle continue modifiche al quadro normativo vigente (D.lgs. 36/2023¹⁰).

I dati raccolti mostrano una crescita per lo più costante dal 2015 al 2022, seguita da un significativo rallentamento negli ultimi due anni, come mostrato nella tabella sottostante.

Tabella 1 - Evoluzione dei bandi BIM nei servizi di architettura e ingegneria (S.A.I.) – 2021-2024 (OICE, 2025)

Anno	Bandi BIM (n.)	Valore (€)	% bandi BIM su totale bandi S.A.I. (% su valore totale)
2021	534	360 mln	9,0% (valore 16,9%)
2022	1003	2103 mln	18,8% (valore 47,6%)
2023	637	1249 mln	13,7% (valore 32,6%)
2024	353	596 mln	13,2% (valore 35,3%)

⁹ L'OICE è l'Associazione nazionale della Confindustria che rappresenta le organizzazioni italiane di ingegneria, di architettura e di consulenza tecnico-economica.

¹⁰ Decreto Legislativo 31 marzo 2023, n. 36: codice che disciplina i contratti pubblici (lavori, servizi e forniture).

Purtroppo, la diffusione reale del BIM in Italia rimane molto eterogenea. Le ricerche svolte sul tema confermano che l'adozione del modello informativo sia avanzata negli appalti pubblici di importo significativo, anche grazie agli obblighi imposti dalle nuove normative, ma rimanga più lenta nelle realtà professionali di piccole e medie dimensioni. Molti studi tecnici continuano infatti ad operare prevalentemente con strumenti CAD tradizionali, a volte integrati marginalmente da software di modellazione tridimensionale. Questo comporta un impatto significativo sul coordinamento interdisciplinare efficace e limita l'accesso ai benefici offerti da un ambiente informativo strutturato.

Le analisi svolte in Italia riportano una significativa differenza tra l'avanzamento formale degli appalti digitalizzati e il reale sviluppo digitale delle imprese che prendono parte alle procedure. Molti professionisti hanno dichiarato di possedere competenze BIM solo di base, spesso neanche sufficienti per la gestione di un processo informativo strutturato e coerente con i requisiti richiesti dalle stazioni appaltanti. Questo disallineamento provoca un ritardo considerevole nello sviluppo del settore, oltre ad alimentare criticità operative.

Nonostante le numerose resistenze, le prospettive future sembrano orientate verso una progressiva normalizzazione del BIM come standard operativo. Le previsioni presenti nelle ultime relazioni di OICE e nei documenti sulla digitalizzazione delle costruzioni mostrano come il numero di gare BIM, seppur oscillante nell'ultimo biennio, sia comunque destinato a stabilizzarsi su valori più alti del passato. Questa prospettiva è

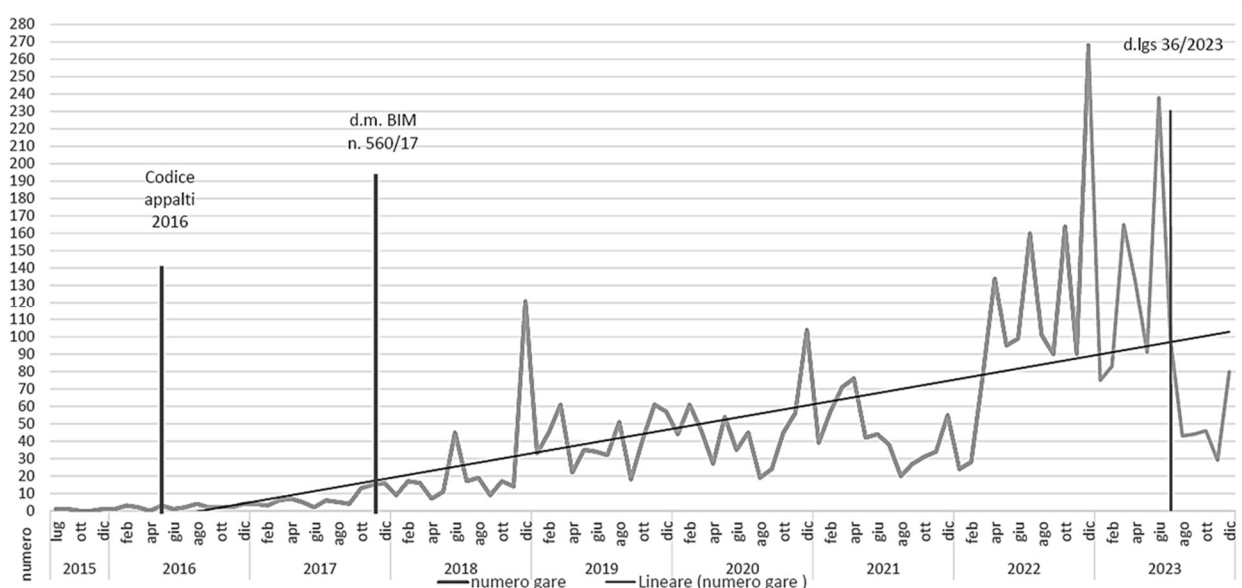


Figura 3 - Andamento del numero di tutti i bandi BIM, 2015-2023 (OICE, 2024)

supportata da due elementi principali: l'entrata in vigore del nuovo Codice dei Contratti Pubblici (D.Lgs. 36/2023), che rafforza l'obbligo di utilizzare modelli informativi negli appalti, e l'impatto dei finanziamenti del PNRR¹¹, che prediligono l'uso di metodologie digitali soprattutto nei progetti infrastrutturali e strategici.

Nell'immediato futuro, quindi, l'evoluzione degli standard internazionali e l'aumento delle competenze digitali dovrebbero favorire una diffusione sempre maggiore del Building Information Modeling, anche nel mercato privato. Come anticipato nei paragrafi precedenti, i report internazionali evidenziano che, nei territori dove la digitalizzazione ha raggiunto livelli più avanzati, l'impiego del BIM si è esteso velocemente ai settori residenziale, commerciale e industriale. Lo stesso percorso è atteso per il mercato italiano, seppur con un ritmo più graduale.

1.1.3. Utilizzi del BIM in ambito sanitario

Per quanto riguarda la modellazione ospedaliera, è importante sottolineare come la progettazione sanitaria rappresenti uno degli aspetti più complessi di tutto il settore delle costruzioni. Edifici complessi come gli ospedali integrano funzioni cliniche, impiantistiche, logistiche e tecnologiche ad alta intensità informativa. Inoltre, essi richiedono continuità di servizio, limitati margini di errore e un'attenzione costante e precisa alla sicurezza dei pazienti, così come all'igiene e all'efficienza dei flussi. In un contesto così delicato, il Building Information Modeling ha assunto nell'ultimo periodo un ruolo centrale come metodologia capace di gestire in modo integrato dati, processi e attori, fornendo un modello digitale unico capace di aiutare nelle decisioni progettuali, verifiche e simulazioni.

La letteratura scientifica afferma che il settore sanitario è uno dei più ricettivi e, contemporaneamente, dei più bisognosi di strumenti digitali avanzati e innovativi. La modellazione informativa permette di raggiungere una maggiore affidabilità nei processi di verifica spaziale e dei dati, una migliore comunicazione tra le varie discipline coinvolte, un supporto più efficace alla manutenzione programmata e una limitazione significativa degli errori tipici dei progetti complessi. La sempre maggiore disponibilità di modelli tridimensionali informativi, insieme all'introduzione di standard internazionali a

¹¹ Il PNRR (Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza) è il piano italiano per l'utilizzo dei fondi del programma europeo "Next Generation EU" per rilanciare l'economia post-pandemia da COVID-19.

suo supporto (come ISO 19650) e all'interoperabilità con tecnologie emergenti (realtà virtuale e aumentata, rappresentazione olografica, simulazioni prestazionali, intelligenza artificiale e Digital Twin) hanno rivoluzionato il metodo con cui si concettualizza, si progetta e si gestisce una struttura sanitaria.

Sicuramente il primo vantaggio derivante dall'approccio BIM nello sviluppo del progetto di un ospedale è il supporto alla progettazione funzionale. Infatti, questa metodologia permette di modellare e simulare layout di reparti, flussi dei percorsi di pazienti, operatori e materiali, posizionamento delle apparecchiature, raggi d'azione di dispositivi e macchinari, spazi di manutenzione e allo stesso tempo di rispettare i requisiti minimi normativi (DM 18/2022 e linee guida regionali). Un esempio del successo di questa applicazione è il progetto del padiglione dell'Ospedale di Cisanello, facente parte dell'Azienda Ospedaliero-Universitaria Pisana, presentato nel 2020. Nella progettazione rientrava una passerella pedonale sopraelevata di collegamento con il Padiglione adiacente. Seppur si tratti di un progetto di piccole dimensioni, questo caso mostra in modo chiaro l'apporto grafico e funzionale dato dal BIM in capo ospedaliero.

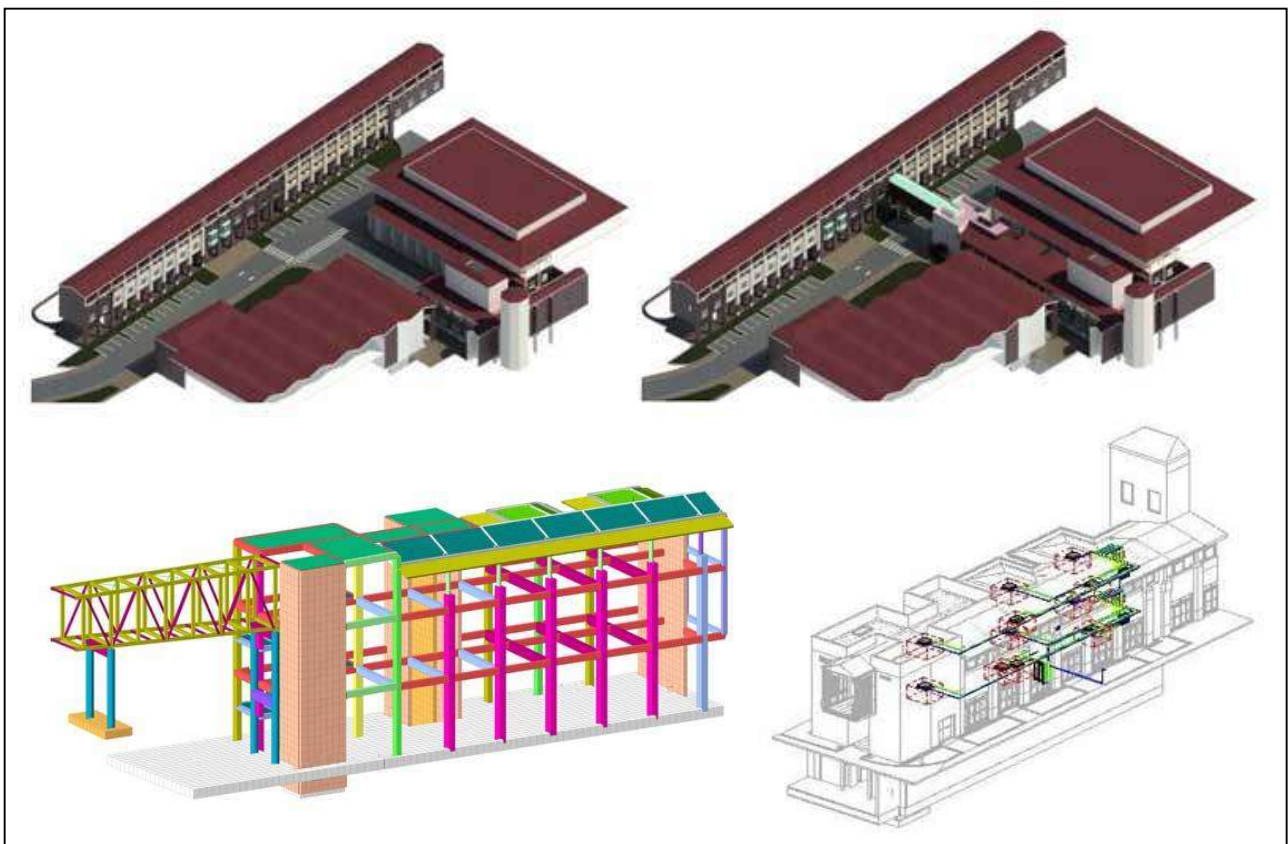


Figura 4 - Modellazione BIM della passerella dell'Ospedale di Cisanello (PI). In alto: modello architettonico prima (sinistra) e dopo (destra) l'intervento. In basso a sinistra: analisi del modello strutturale. In basso a destra: modellazione impiantistica (Mascia et al., 2020)

Infatti, grazie alla realizzazione del modello tridimensionale, è stata possibile l'individuazione di una soluzione integrata che potesse soddisfare gli aspetti medico-organizzativi e quelli operativi. Inoltre, l'approccio adottato ha permesso la progettazione dei numerosi impianti presenti, con particolare attenzione alle interazioni con l'impiantistica dei padiglioni adiacenti. La modellazione è risultata di fondamentale importanza anche per quanto concerne il calcolo strutturale (Mascia et al., 2020).

Un altro punto di forza del processo di modellazione informativa è sicuramente la gestione del coordinamento interdisciplinare ad alta complessità. Gli ambienti sanitari presentano un'elevata concentrazione di impianti di tutte le tipologie edilizie: HVAC¹², antincendio, elettrica, schermature RX, reti ICT¹³ critiche. Il BIM permette di integrare i modelli disciplinari in un modello federato che supporta i processi di clash detection, di verifica degli ingombri e di tracciamento dei percorsi tecnici. Uno dei fattori fondamentali per garantire il corretto coordinamento è sicuramente l'interoperabilità, ovvero la comunicazione funzionale tra i molteplici programmi utilizzati dai vari attori coinvolti nel processo di progettazione di un'opera. Uno studio condotto nel 2023 dalla collaborazione tra "University College London" nel Regno Unito e "Huazhong University of Science and Technology" in Cina ha analizzato la funzionalità nello scambio di flussi di dati tra BIM e altre tecnologie digitali emergenti che possono essere applicate nella progettazione e costruzione sanitaria. Queste ultime includono realtà virtuale (VR), identificazione a radiofrequenza (RFID), sistemi cyber-fisici (CPS), Internet of Things (IoT), sistemi informativi geografici (GIS), intelligenza artificiale (AI), realtà mista (MR), tracciamento del sito tramite droni (UAV), assemblaggio robotico e cloud computing. Tra tutte le tecnologie citate, secondo gli autori, la realtà virtuale rappresenta un terzo del totale e spesso promuove l'utilizzo del BIM per migliorare la consapevolezza spaziale degli stakeholder e semplificare la visualizzazione, data la quantità di dati strutturati presenti nel modello federato. Dalle conclusioni dello studio si evince che in ambito sanitario il contributo del BIM risulta fondamentale, soprattutto grazie alla sua capacità di comprendere diversi settori e metterli in relazione tra loro. Inoltre, il suo potenziale può essere ampliato affiancandolo all'utilizzo di altre tecnologie innovative utili specialmente in un settore così complesso come quello ospedaliero (Tan et al., 2023).

¹² HVAC indica l'insieme dei sistemi di riscaldamento, ventilazione e condizionamento dell'aria.

¹³ Con reti ICT si fa riferimento alle reti di telecomunicazioni che sono parte integrante delle Tecnologie dell'Informazione e della Comunicazione (ICT). Si tratta di sistemi di dispositivi interconnessi (computer, server, router, ...) che consentono di condividere dati e risorse.

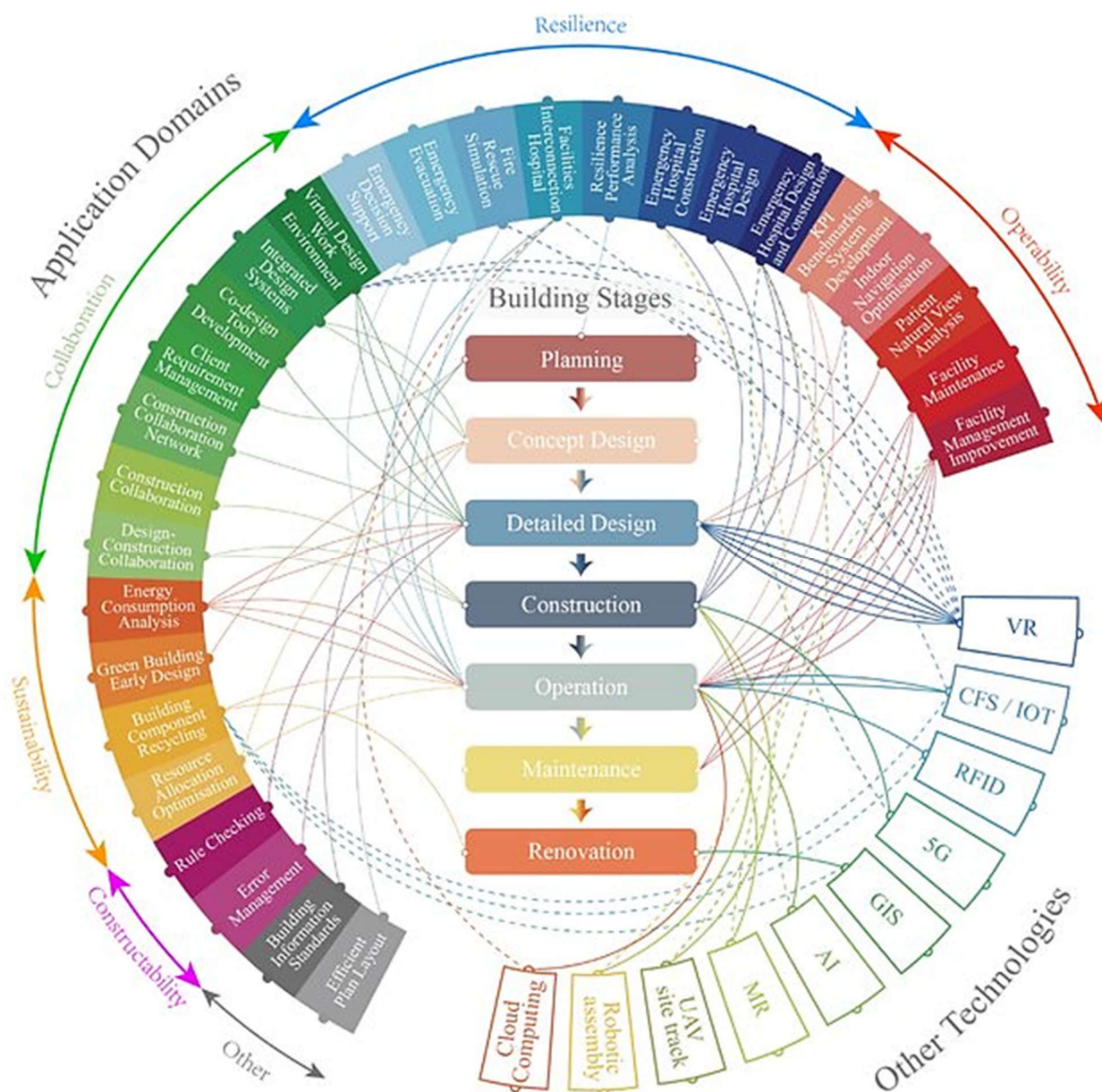


Figura 5 – Tecnologie emergenti che si interfacciano con il BIM (Tan et al., 2023)

Uno dei contributi più importanti forniti dal BIM alla progettazione sanitaria riguarda la possibilità di confrontare in modo oggettivo e sistematico diverse soluzioni progettuali. Il modello informativo consente di estrarre automaticamente tutti i parametri del progetto, ovvero superfici, dotazioni, tempi, capacità funzionali e indicatori prestazionali, rendendo così immediato il paragone tra diversi layout o schemi distributivi. Ciò permette di valutare soluzioni alternative non solo sulla base della geometria, ma anche in termini di efficienza dei flussi, compattazione dei reparti, accessibilità, requisiti clinici e costi complessivi. La letteratura scientifica ha dimostrato che il BIM può essere utilizzato per realizzare veri e propri sistemi di benchmarking di progetti ospedalieri, in grado di

confrontare strutture diverse attraverso una piattaforma di dati coerenti e standardizzati. L'articolo "BIM-based benchmarking system for healthcare projects: Feasibility study and functional requirements" pubblicato nel 2018 definisce il benchmarking come un *processo sistematico, basato su dati, di miglioramento continuo che prevede la misurazione delle prestazioni per identificare, raggiungere e sostenere le migliori pratiche* (Choi et al., 2018). Questo metodo richiede la valutazione dei dati del progetto tramite misure di performance o metriche e il loro confronto con informazioni simili raccolte da fonti esterne. I risultati dell'analisi permettono di stabilire obiettivi di miglioramento identificando esplicitamente e in modo puntuale le problematiche e contribuendo a promuovere cambiamenti orientati alla realizzazione di progetti migliori e più funzionali. La pratica del benchmarking, nata per la gestione degli investimenti, ha portato benefici significativi anche nel settore delle costruzioni. L'articolo prosegue la ricerca analizzando i dati del National Hospital Facilities Benchmarking Project (NHFBP), che contiene informazioni di 78 ospedali realizzati tra il 2016 e il 2018 e, in particolare, verifica quali dati necessari a questo processo si possono generare in modo automatico da un modello BIM. Gli autori hanno poi individuato i requisiti tecnici e funzionali per implementare un sistema di benchmarking basato sul Building Information Modeling, integrabile con database e sistemi informativi sanitari.

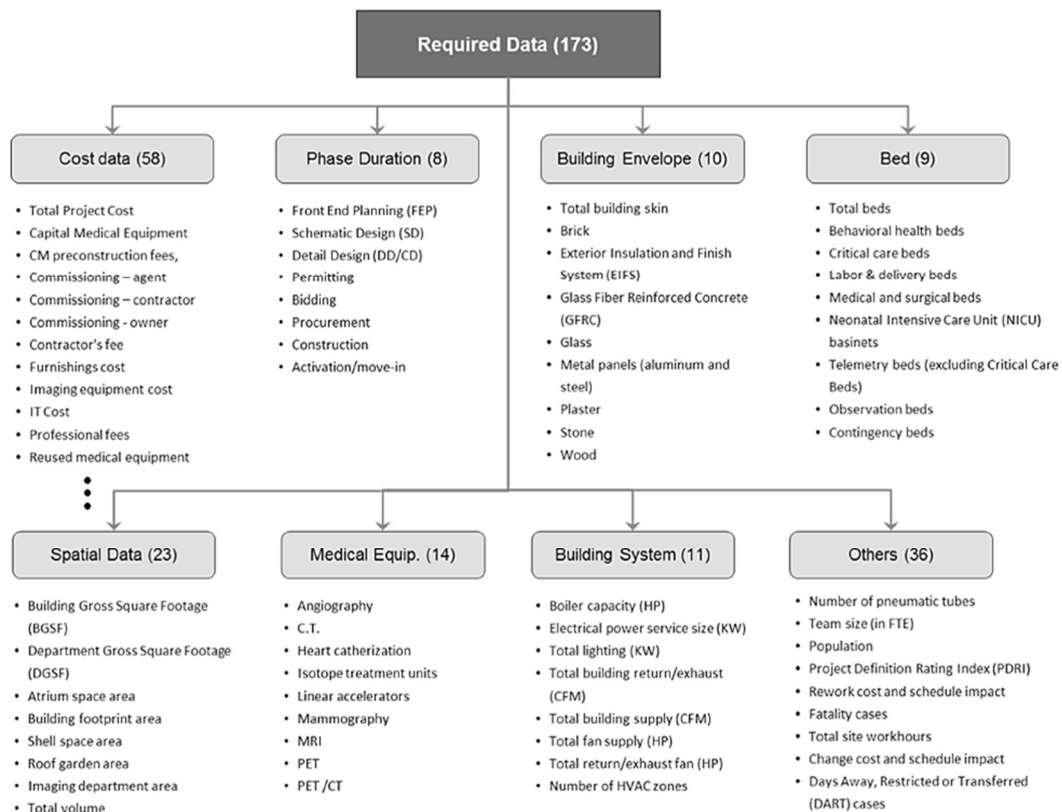


Figura 6 – Dati richiesti per le metriche NHFBP per categoria (Choi et al., 2018)

Category	Unit	Case models					
		A	B	C	D	E	F
Cost/schedule							
Cost	US Dollars	×	×	×	×	×	×
Phase duration	Days	×	×	×	×	×	×
Building envelope							
Total building envelopes	Square feet	●	●	●	●	●	●
Specific material	Square feet	●	●	●	●	×	●
Bed							
Total beds	Each	●	●	●	×	×	×
Specific bed	Each	●	●	●	×	×	×
Space/room							
Area	Square feet & cubic feet	●	●	●	●	●	●
Room	Each & square feet	●	●	●	●	●	●
Medical equipment	Each	●	●	●	×	×	×
Building system							
HVAC Zone	Each	●	×	●	●	×	×
HVAC system	Varies	○	×	○	○	×	○
Electrical system	Varies	○	×	○	○	×	○
Others	Varies	○	×	×	×	×	×
Note: ● denotes fully available; ○ denotes partially available; × denotes not available.							

Figura 7 – Dati richiesti da NHFBP per categoria e loro disponibilità per caso tipo (Choi et al., 2018)

Dai risultati dello studio risulta che l'82.8% dei dati richiesti dal benchmarking ospedaliero può essere parzialmente o completamente generato attraverso il BIM. In aggiunta, il modello parametrico garantisce coerenza tra progetti diversi grazie a oggetti parametrici e classificazioni standardizzate.

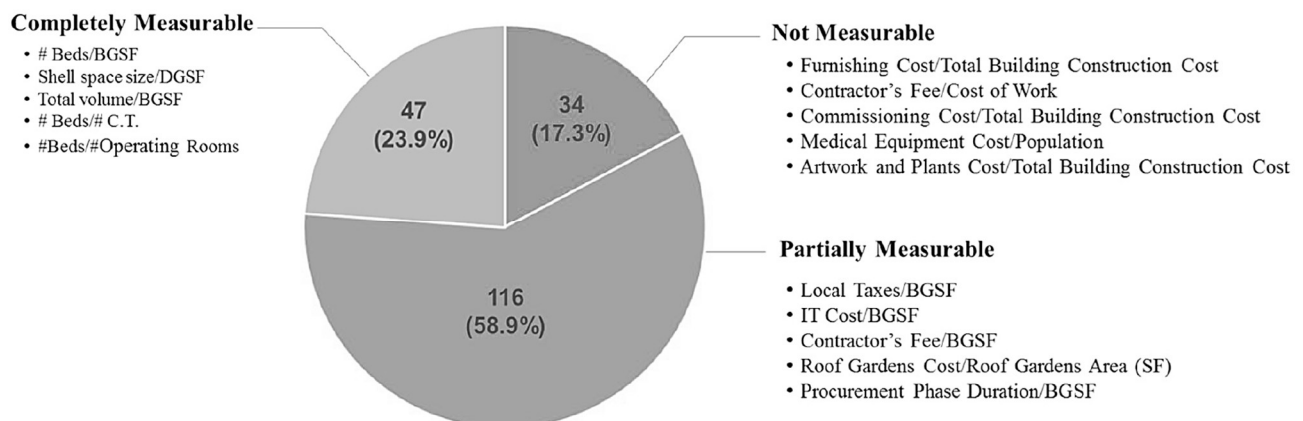


Figura 8 – Metriche di benchmarking ospedaliero misurabili mediante BIM (Choi et al., 2018)

Alla luce di queste osservazioni, l'articolo dimostra che il BIM è adatto a generare set di dati completi per il benchmarking ospedaliero che possono essere utilizzati per il confronto tra diverse soluzioni progettuali e favorire la scelta più sicura ed efficiente, seguendo tutti i requisiti particolari che caratterizzano edifici complessi e sensibili, come quelli sanitari (Choi et al., 2018).

È importante considerare anche l'aspetto di manutenzione e gestione dell'opera poiché si tratta di una delle fasi più rilevanti nel ciclo di vita di un edificio sanitario, arrivando talvolta ad incidere fino al 70-80% dei costi complessivi, superando di molto quelli di progettazione e costruzione. In questo contesto, il BIM si sta sempre più affermando come strumento strategico per implementare l'efficienza, la tracciabilità e l'affidabilità delle attività operative, soprattutto grazie alla possibilità di integrare in un unico modello digitale l'intero patrimonio informativo di un ospedale.

Uno studio redatto nel 2019 ha indagato come le funzionalità digitali legate al Building Information Modeling possano raccogliere un'ampia gamma di informazioni per migliorare il processo decisionale in materia di gestione del patrimonio costruito (Built Asset Management, BAM) durante la fase di utilizzo di edifici a scopo sanitario o ospedaliero. Gli autori hanno proposto un framework integrato che sfrutta il BIM come piattaforma centrale per integrare dati provenienti dall'infrastruttura ospedaliera e dai sistemi di facility management¹⁴, anche tramite il monitoraggio operativo della struttura. Il framework prevede:

- un modello BIM ricco di informazioni, standardizzato e interrogabile;
- collegamenti a risorse di dati esterni contenenti manuali, schede tecniche e informazioni sulle apparecchiature;
- interfacce con sistemi di gestione manutentiva per programmare gli interventi quando necessario;
- la possibilità di integrare sensori e sistemi IoT per monitorare prestazioni e condizioni operative.

L'obiettivo finale è produrre uno strumento innovativo che riduca la frammentazione informativa e permetta una valutazione più rapida delle problematiche da parte dei tecnici del settore, accelerando così l'analisi decisionale. Il lavoro conclude che il BIM è operativamente e tecnicamente adatto a supportare la manutenzione degli edifici

¹⁴ Per facility management si intende la gestione integrata degli edifici, degli impianti e di tutti i servizi di supporto necessari, con lo scopo di garantire continuità operativa, sicurezza, efficienza tecnica e controllo dei costi di un bene immobiliare.

sanitari, dimostrando che può diventare la fonte informativa principale per la gestione degli asset ospedalieri, in quanto migliora sensibilmente la qualità decisionale e riduce inefficienze tipiche dei sistemi tradizionali (Wanigarathna et al., 2019).

Nonostante i numerosi vantaggi, il BIM presenta alcuni limiti specifici nel contesto sanitario. Per esempio, un problema spesso citato nella letteratura scientifica è la scarsa standardizzazione dei modelli ospedalieri. Infatti, i particolari componenti tecnici legati alla destinazione d'uso (come apparecchiature medicali e impianti critici) sono modellati in modo disuniforme a seconda dei progetti e degli studi che se ne occupano. Questo può portare ad un'incoerenza dei dati impattante e a problemi di comunicazione tra gli attori coinvolti nel processo di progettazione. La soluzione, individuata già da molti ricercatori e professionisti, è l'adozione di librerie standard, come IFC4 ADD2, Revit Medical Libraries o UNI 11337¹⁵.

Un altro limite attuale della metodologia informativa è l'interoperabilità incompleta. Alcune ricerche hanno mostrato come il passaggio da BIM ad altri sistemi o programmi non è ancora fluido. Questo è dovuto al fatto che il processo di evoluzione di questa tecnologia coinvolge più aspetti e discipline, che devono a loro volta aggiornarsi e rendere possibile la comunicazione tra le varie piattaforme. Un miglioramento già avviato di questo aspetto è l'implementazione dei formati IFC completi, che garantiscono lo scambio fedele e strutturato delle informazioni contenute nei modelli tra software differenti, mantenendo geometrie, proprietà e relazioni degli oggetti, e garantendo il coordinamento interdisciplinare e la tracciabilità dei dati.

Dal punto di vista medico, un limite del settore è l'assenza di standard clinici digitalizzati. Infatti i requisiti ospedalieri, come spazi minimi o logiche funzionali, spesso non sono formalizzati in formati leggibili dal BIM. Questo porta ad un significativo aumento delle tempistiche di modellazione per trovare e inserire manualmente tali dati nei parametri degli elementi e dei locali del modello. Per ovviare a questa problematica è necessario lo sviluppo di *rule-based checking systems*, ossia sistemi di controllo basati su regole applicati al BIM. Si tratta di un meccanismo automatico (o semi-automatico) che verifica che il modello rispetti un insieme di regole prestabilite, che possono riguardare requisiti normativi, standard di modellazione o criteri funzionali, logistici e tecnici. Tale

¹⁵ IFC4 ADD2 è lo standard aperto di buildingSMART per l'interoperabilità dei modelli BIM; le "Revit Medical Libraries" sono librerie parametriche specifiche per l'ambito sanitario; la UNI 11337 è la norma italiana che regola processi, oggetti e livelli informativi del BIM.

processo, nel settore sanitario, può automatizzare la verifica di standard clinici, impiantistici e legislativi che caratterizzano ospedali e reparti ad alta complessità.

Le competenze richieste per sfruttare la metodologia BIM durante tutte le fasi di progettazione, costruzione e gestione possono risultare complesse, soprattutto se paragonate a semplici strumenti di disegno digitale come il CAD. Tuttavia, sempre di più in Italia e all'estero gli enti accademici e le università si stanno impegnando a formare nuove generazioni di professionisti in grado non solo di utilizzare gli strumenti BIM, ma anche di potenziarne l'efficacia con nuove idee e innovazioni progettuali.

Il quadro delineato conferma come il Building Information Modeling rappresenti al giorno d'oggi una delle metodologie più efficaci per affrontare la complessità progettuale, gestionale e operativa delle strutture sanitarie. La combinazione di modelli digitali, processi digitalizzati e simulazioni multidisciplinari permette di governare un patrimonio edilizio caratterizzato da un'elevata densità impiantistica, da requisiti clinici coerenti e da una continua necessità di efficienza dei flussi e delle prestazioni. Le prospettive aperte dal BIM includono inoltre l'integrazione con tecnologie emergenti, tra cui realtà virtuale, intelligenza artificiale, IoT e Digital Twin, che ampliano ulteriormente le capacità di controllo dell'opera.

1.2. VR

1.2.1. Storia ed evoluzione delle tecnologie VR

Nel corso della storia, ci sono stati diversi tentativi di sviluppare esperienze di realtà virtuale. Quest'ultima è spesso considerata come una tecnologia digitale contemporanea resa possibile dall'elaborazione avanzata, dai visori moderni e dalla grafica in tempo reale. In realtà le esperienze visive immersive sono di gran lunga antecedenti ai media digitali. I fondamenti concettuali della VR risalgono a oltre duecento anni fa, ovvero all'invenzione dell'immagine panoramica alla fine del XVIII secolo. La storia della VR è quindi profondamente radicata nell'evoluzione della rappresentazione visiva, dello spazio architettonico e dell'illusione percettiva.

Il primo antenato della realtà virtuale è stato un panorama creato nel 1787 da Robert Barker, che introdusse non solo un'immagine continua a 360 gradi, ma anche un sistema spaziale e architettonico completo concepito e progettato come un "quadro circolare

senza confini", in cui lo spettatore doveva essere posizionato al centro della rappresentazione e circondato da un campo visivo completo. Tra la fine del XVIII e l'inizio del XX secolo, i panorami divennero molto popolari, portando alla costruzione di veri e propri edifici dedicati come il Colosseo di Londra e la Rotonde des Panoramas a Parigi. Queste strutture dimostrano come l'immersione non veniva raggiunta attraverso il solo uso di immagini, ma grazie ad una combinazione attentamente orchestrata di architettura, illuminazione, sequenza spaziale e scenografia.

Lo sviluppo della visione immersiva è strettamente legato a due grandi tradizioni culturali: la pittura paesaggistica e il teatro. Soprattutto durante il Secolo d'Oro olandese¹⁶, nella pittura il paesaggio si è evoluto da elemento di sfondo a soggetto principale della rappresentazione. L'espansione dei formati delle tele e l'esplorazione degli effetti atmosferici hanno permesso campi visivi sempre più ampi e continui. Parallelamente, le rappresentazioni panoramiche sono state adottate per scopi scientifici, topografici e militari, fungendo da strumenti visivi sinottici in grado di combinare una visione d'insieme spaziale e informazioni dettagliate, in modi che anticipavano i sistemi di mappatura digitale contemporanei.

Lo spazio teatrale rappresenta una seconda fondamentale eredità della visione immersiva. Il teatro rinascimentale si basava sulla prospettiva lineare e su un punto di vista fisso, separando nettamente lo spettatore dalla scena rappresentata. Tale separazione fu poi messa in discussione dalle innovazioni nella scenografia e nell'illuminazione, in particolare attraverso il lavoro di scenografi come Adolphe Appia e il concetto di "Teatro Totale", che spostò l'attenzione dalla profondità pittorica alla presenza spaziale, abolendo i fondali dipinti a favore di un palcoscenico concepito come un ambiente immersivo, tridimensionale e sensoriale.

Queste nuove tipologie di illustrazione immersiva hanno definito una rottura decisiva con la tradizionale immagine incorniciata. Rimuovendo una direzione di visione privilegiata e circondando lo spettatore con un'ambientazione continua, i panorami forzavano il movimento del corpo e dissolvevano il rapporto fisso tra osservatore e rappresentazione. Questo effetto era rafforzato da strategie architettoniche come percorsi di accesso nascosti, illuminazione controllata e l'introduzione di un "terreno artificiale", che sfumava

¹⁶ Il Secolo d'Oro è un periodo nella storia dei Paesi Bassi che corrisponde più o meno al XVII secolo, durante il quale il commercio, le scienze e le arti olandesi furono tra le più acclamate in Europa e nel mondo occidentale.



Figura 9 - Sezione di un esempio di panorama (Lescop, 2017)

il confine tra spazio reale e spazio rappresentato. L'illusione di immersione dipendeva quindi dalla progressiva transizione dello spettatore nell'ambiente narrativo, piuttosto che dal solo realismo visivo.

Nel corso del XIX e dell'inizio del XX secolo, si è sempre più cercato di migliorare l'illusione immersiva attraverso le numerose innovazioni tecnologiche sviluppate in quegli anni. L'introduzione della fotografia ha portato allo sviluppo di telecamere panoramiche e sistemi di proiezione, mentre i primi esperimenti cinematografici hanno esplorato formati di proiezione multischermo e circolari. Questi tentativi hanno spesso fallito a causa della complessità, di problemi di sicurezza o di difficoltà di sincronizzazione. Tuttavia, hanno introdotto principi chiave che rimangono centrali nella realtà virtuale odierna, tra cui la stimolazione multisensoriale, il movimento e gli effetti ambientali come suono, vento e vibrazioni.

L'immersione può essere intesa come il risultato della combinazione di disposizione spaziale e dei dispositivi tecnologici adeguati che riesce a produrre la sensazione di trovarsi all'interno di un mondo alternativo, perdendo ogni contatto visivo della realtà. Un'esperienza immersiva può essere descritta attraverso tre modalità interconnesse:

- **L'avvolgimento** fisico e percettivo dello spettatore all'interno di un'immagine o di un ambiente, ottenuto circondando i campi visivi ed eliminando i riferimenti esterni;

- La **saturazione**, che si verifica quando più canali sensoriali vengono stimolati simultaneamente, sovrastando la percezione e isolando l'utente dal mondo esterno;
- La **partecipazione**, che implica l'interazione con l'ambiente, consentendo all'utente di agire all'interno dello spazio rappresentato e rafforzando la percezione di aver oltrepassato il confine tra realtà e finzione.

Un passo decisivo verso la moderna realtà virtuale avvenne nei primi anni '60 con lo sviluppo dei primi dispositivi immersivi indossabili. Nel 1960, Morton Heilig brevettò la "Telesphere Mask", un apparato di visione stereoscopica progettato per l'uso individuale, considerato un precursore dei moderni visori VR. Poco dopo, Heilig sviluppò il "Sensorama", un sistema immersivo in grado di fornire immagini tridimensionali, suoni stereo, movimento, vibrazioni, vento e persino stimoli olfattivi. A differenza delle architetture panoramiche, questi dispositivi isolavano l'utente dall'ambiente esterno e saturavano il sistema sensoriale, intensificando significativamente l'esperienza immersiva. Sebbene tecnologicamente limitate e commercialmente infruttuose all'epoca, le invenzioni di Heilig introdussero i principi fondamentali della realtà virtuale, come l'integrazione, l'isolamento multisensoriale e l'immersione individuale, che rimangono centrali negli attuali strumenti VR. (Lescop, 2017)

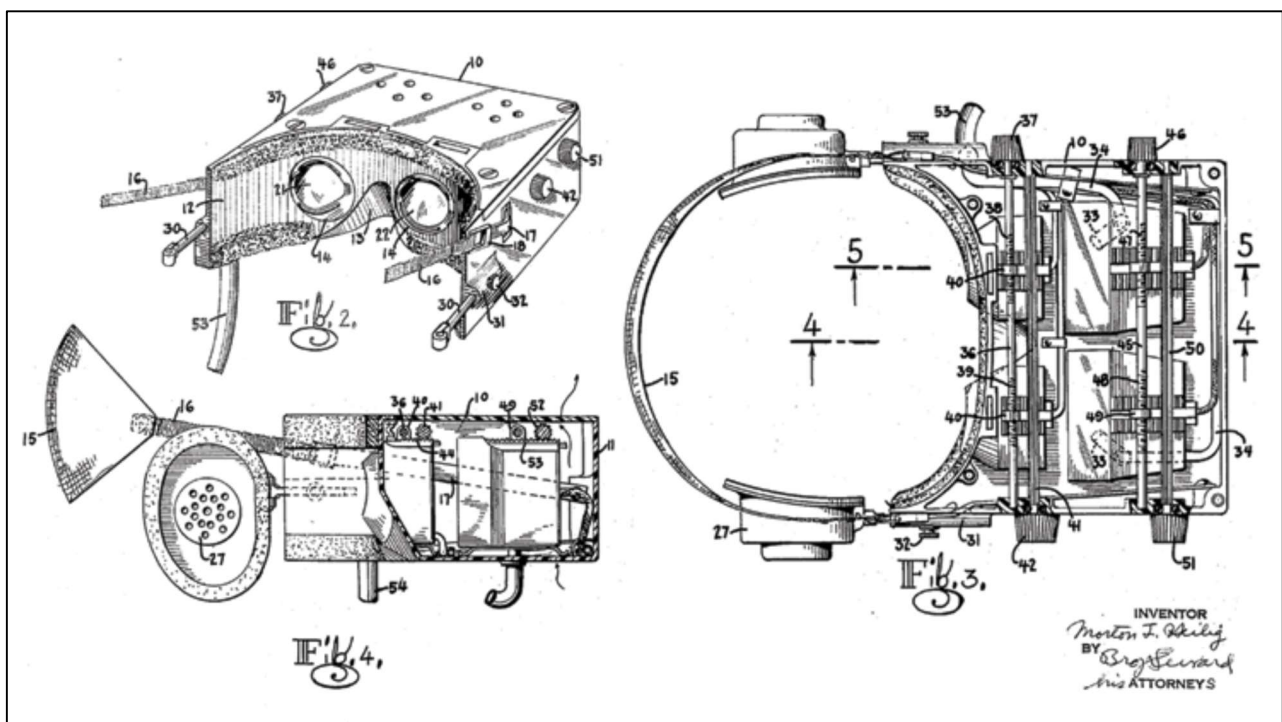


Figura 10 - Rappresentazione della Telesphere Mask di Morton Heilig nel 1960 (Lescop, 2017)

I sistemi di realtà virtuale contemporanei si basano su tecnologie digitali, come i visori, l'audio spaziale e le interfacce interattive, per riprodurre i tre principi fondamentali (avvolgimento, saturazione e partecipazione). Nonostante i significativi progressi, la VR ha dovuto affrontare importanti limiti. Costi elevati, requisiti spaziali, complessità tecnica e problemi come la "malattia da realtà virtuale"¹⁷ hanno inizialmente limitato l'adozione su larga scala. La popolarità di questa innovazione ha registrato un forte aumento nell'ultimo decennio, in particolare a partire dal 2016 quando diverse aziende hanno iniziato a rilasciare hardware a basso costo e di facile utilizzo, rendendo la tecnologia più accessibile ad un pubblico più ampio.

Accanto alla realtà virtuale, la realtà aumentata (AR) si è affermata nel tempo come approccio concorrente, integrando i contenuti digitali nell'ambiente fisico anziché sostituirlo completamente. I sistemi di realtà aumentata si sono dimostrati più accessibili e adattabili ai contesti quotidiani, mentre la VR rimane limitata dalla necessità di spazi controllati e attrezzature dedicate. In questo senso, le tecnologie immersive contemporanee riflettono una continuità piuttosto che una rottura con i sistemi panoramici storici, ribadendo che l'immersione non è solo una questione di sofisticazione tecnologica, ma di progettazione percettiva, organizzazione spaziale e coinvolgimento narrativo.

Per arrivare ad avere chiaro il concetto di realtà virtuale è necessario distinguere da altre tecnologie simili, come la realtà aumentata e quella mista. La visione convenzionale di un ambiente VR è quella in cui l'osservatore partecipante è totalmente immerso e in grado di interagire con un mondo completamente sintetico. In questo modo si riesce ad imitare le proprietà di alcuni spazi reali, esistenti o completamente fittizi. Tuttavia, è possibile anche superare i limiti della realtà creando un mondo in cui le leggi fisiche che normalmente governano spazio, tempo, meccanica e proprietà dei materiali non valgono più. È necessario però evitare che l'etichetta VR venga utilizzata anche in associazione a una varietà di altri ambienti, ai quali l'immersione totale e la sintesi completa non appartengono necessariamente, ma che comunque si collocano da qualche parte lungo uno spettro di virtualità.

Realtà virtuale (VR), realtà aumentata (AR) e realtà mista (MR) rappresentano approcci diversi all'integrazione di contenuti digitali e percezione umana, riscontrando le principali

¹⁷ La malattia da realtà virtuale è un insieme di disturbi fisici e neuro-percettivi che alcune persone sperimentano durante o dopo l'uso di sistemi di realtà virtuale immersiva.

differenze nel grado di immersione, sostituzione ambientale e interazione con il mondo fisico.

- La **realità virtuale**, come anticipato, sostituisce completamente l'ambiente reale con uno generato dal computer, immergendo l'utente in uno spazio sintetico percettivamente dominante e visivamente isolato dal mondo esterno circostante. Secondo una prospettiva di progettazione incentrata sull'uomo, questo tipo di tecnologia è più efficace quando sono richiesti un'attenzione completa, un'immersione spaziale e una simulazione esperienziale, come per esempio nella formazione, nella valutazione del progetto o in scenari terapeutici in cui l'ambiente reale fungerebbe da distrazione. (Jerald, 2015)
- La **realità aumentata**, invece, preserva il mondo reale come quadro di riferimento primario e lo sovrappone a informazioni digitali. Essa non mira all'immersione completa, ma al miglioramento contestuale, permettendo agli utenti di conservare la consapevolezza situazionale ricevendo al contempo ulteriori segnali visivi, dati o indicazioni. Per questo motivo il suo utilizzo è particolarmente indicato in contesti operativi, di manutenzione o clinici, in cui l'interazione con oggetti reali, l'orientamento spaziale e la sicurezza sono fondamentali. (Barsom et al., 2016)
- La **realità mista** occupa una posizione intermedia nello spettro reale-virtuale, combinando elementi sia di VR che di AR. In questi sistemi gli oggetti digitali e fisici coesistono e possono interagire tra loro in tempo reale, consentendo l'ancoraggio spaziale, l'occlusione e l'interazione bidirezionale. La MR è vantaggiosa in ambienti complessi in cui gli elementi virtuali devono rispondere in modo coerente ai vincoli fisici, come la progettazione collaborativa, la visualizzazione medica o la pianificazione procedurale. Sebbene offra una maggiore integrazione tra domini reali e virtuali, questa tecnologia richiede anche risorse di rilevamento, tracciamento e calcolo più complesse e avanzate. (Speicher et al., 2019)

Nel contesto della progettazione edile e civile tutti questi sistemi di estensione della realtà possono essere utili in ambiti differenti. Dal punto di vista dell'analisi delle interferenze in una fase di progettazione preliminare e nella presentazione del progetto alla committenza o a personale non tecnicamente qualificato in ambito costruttivo, sicuramente la realtà virtuale presenta i maggiori vantaggi, come spiegato nel dettaglio nel prossimo capitolo.

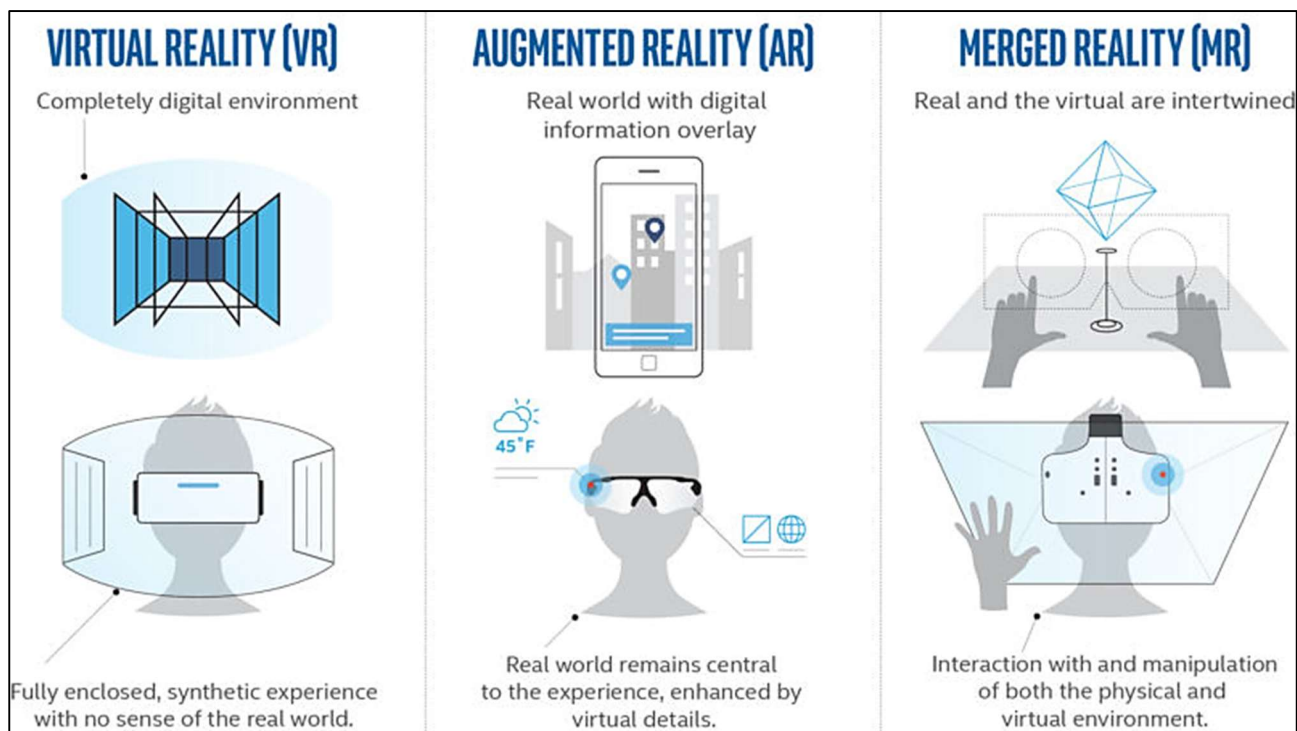


Figura 11 - Differenze tra VR, AR e MR (*Applied Art & Technology*, 2017)

Nel contesto della progettazione edile e civile tutti questi sistemi di estensione della realtà possono essere utili in ambiti differenti. Dal punto di vista dell'analisi delle interferenze in una fase di progettazione preliminare e nella presentazione del progetto alla committenza o a personale non tecnicamente qualificato in ambito costruttivo, sicuramente la realtà virtuale presenta i maggiori vantaggi, come spiegato nel dettaglio nel prossimo capitolo.

Dal punto di vista tecnico, la tecnologia VR prevede la presenza di uno schermo ad alta risoluzione, di solito LCD o OLED¹⁸, all'interno di un visore che deve essere posizionato il più vicino possibile agli occhi. Combinando lo schermo con lenti stereoscopiche, si riesce a simulare un'esperienza tridimensionale e immersiva. Gli ambienti virtuali sono programmati per integrarsi e comunicare con i sensori che rilevano in tempo reale la posizione e l'orientamento di un oggetto o di una parte del corpo dell'utente all'interno dello spazio fisico e per trasferire queste informazioni alla scena digitale. In questo modo,

¹⁸ Con LCD si intende il display a cristalli liquidi, un tipo di schermo che utilizza le proprietà di modulazione della luce dei cristalli liquidi. L'OLED (diodo organico a emissione di luce) è una tecnologia che permette di realizzare schermi a colori con la capacità di emettere luce propria senza richiedere componenti aggiuntivi per essere illuminati, a differenza dei display LCD che vengono illuminati da una fonte di luce esterna.

muovendo la testa, il visore e l'ambiente virtuale comunicano per creare uno spazio realistico, ingannando la mente e i sensi dell'utente. I progetti di realtà virtuale più all'avanguardia sfruttano le sensazioni tattili e persino gli odori, ma nelle applicazioni più comuni l'approccio è limitato alla vista, all'udito e alla manipolazione di oggetti semplici, garantendo comunque una serie di possibilità e innovazioni non indifferente.

Il componente più importante della realtà virtuale moderna è il visore, un elemento hardware che in genere include i display che mostrano l'ambiente digitale, le lenti che lo rendono tridimensionale agli occhi e una soluzione audio, che si tratti di altoparlanti o cuffie. La maggioranza dei visori è dotata di un meccanismo di aggancio alla testa e alcuni hanno anche telecamere integrate per il tracciamento.

Il **visore** può essere considerato l'unico componente hardware assolutamente necessario per l'utilizzo della realtà virtuale. Tuttavia, la maggior parte dei sistemi VR utilizza anche altri elementi per migliorare l'esperienza e renderla più funzionale ed efficiente:

- **Tracker:** alcuni visori utilizzano il cosiddetto tracciamento "inside-out", in cui sono presenti telecamere di rilevamento della profondità sul visore per rilevarne la posizione, mentre altri hanno tracker esterni che devono essere montati agli angoli dell'area fisica in cui si trova l'utente. Ogni visore include, tuttavia, un accelerometro e un giroscopio per tracciare la sua inclinazione e il suo orientamento.
- **Controlli:** i visori comuni sono spesso accompagnati da controller palmari con l'eventuale presenza di pulsanti per svolgere le funzioni interattive all'interno dell'interfaccia virtuale, mentre quelli più avanzati dispongono di dispositivi in grado di tracciare il movimento delle singole dita. Alcune configurazioni all'avanguardia permettono il tracciamento delle mani e delle dita senza l'uso di controller fisici, e in alcuni casi addirittura di tutto il corpo, in modo da poter utilizzare gambe e piedi come input aggiuntivi.
- **Processore grafico:** le esperienze di realtà virtuale richiedono molta potenza di elaborazione per essere renderizzati in modo realistico, anche con i visori più accessibili e meno avanzati. Per questo motivo, è necessaria la presenza di un processore integrato o di un sistema potente, come un PC desktop, un laptop o una console.

Grazie a questi elementi, in VR oltre all'esperienza visiva immersiva è possibile interagire con gli oggetti, costruirne e in alcuni casi addirittura chinarsi per osservare qualcosa da vicino o sdraiarsi sulla schiena e guardare il cielo stellato. Inoltre, grazie ai tracker e la

configurazione a 360 gradi, si riesce a guardare dietro di sé e da tutte le angolazioni possibili muovendo la testa, al contrario del classico monitor che ha solo un'interfaccia bidimensionale. (Lacoma, 2023)

1.2.2. Applicazione della VR nella progettazione

Il rapporto tra la rappresentazione architettonica e il prodotto finale previsto dalla progettazione ha subito un importante cambiamento nel corso della storia. L'era dell'evoluzione delle tecnologie e l'assistenza fornita dai computer ha introdotto una nuova dimensione nella presentazione progettuale e nelle varie fasi del processo edilizio. Con il rapido sviluppo di hardware e software, si è arrivati ad essere capaci di produrre immagini e altri tipi di rappresentazione con tecniche sempre più innovative. Data la natura del settore edile, un tipico progetto di costruzione è solitamente basato sulla collaborazione tra stakeholder diretti e indiretti che rappresentano una ricca diversità di competenze, abitudini e discipline. Questi professionisti devono lavorare insieme per la realizzazione del prodotto finale e pertanto è necessaria una comunicazione funzionale ed efficiente che garantisca che tutti i soggetti coinvolti condividano la stessa comprensione del progetto.

Dal momento che il pensiero, la pianificazione e la creazione condivisi sono punti chiave per qualsiasi tipo di collaborazione lavorativa e professionale, la gestione della comunicazione e dello scambio di dati ed informazioni all'interno di un team progettuale è di vitale importanza, soprattutto nel mondo delle costruzioni dove ogni attore coinvolto deve essere costantemente aggiornato su tutti gli aspetti del processo edilizio e su tutte le sue discipline. (Bassanino et al., 2010)

La prima forma basilare di comunicazione progettuale è stata per molti anni quella del disegno tecnico, che si è poi evoluto nel CAD. Con l'acronimo CAD (Computer Aided Design) si intende l'insieme di metodi, tecniche e strumenti informatici utilizzati per la progettazione, la rappresentazione e la gestione di oggetti e sistemi attraverso modelli digitali bidimensionali e tridimensionali. Con il progressivo sviluppo delle tecnologie di realtà virtuale, nel settore delle costruzioni si è diffuso un l'approccio sempre più orientato alla modellazione tridimensionale, allo scambio dati tra sistemi di progettazione assistita e ambienti VR e all'utilizzo di metodi interattivi per la visualizzazione e la valutazione del progetto. Per permettere la realizzazione di veri e propri ambienti virtuali nel 1994 nacque il Virtual Reality Modeling Language (VRML),

ovvero un linguaggio standard basato su testo che permetteva di descrivere scene e modelli tridimensionali e interattivi all'interno di pagine internet. (Whyte et al., 2000)

Sebbene attualmente considerato obsoleto e superato da tecnologie come glTF¹⁹ e WebXR²⁰, VRML è stato fondamentale per la visualizzazione 3D in ambito tecnico e ingegneristico, permettendo di navigare in ambienti virtuali tramite browser e supportando animazioni, grafiche tridimensionali e oggetti interattivi. Questo sviluppo tecnologico ha progressivamente ampliato le possibilità applicative della realtà virtuale, che oggi viene utilizzata in modo strutturato lungo diverse fasi del processo edilizio

Delgado et al. (2020), per fornire un quadro generale sulla situazione attuale, ha presentato uno studio sul panorama di utilizzo della realtà aumentata e virtuale nei settori dell'architettura, dell'ingegneria e dell'edilizia, definendo sei principali casi d'uso per queste tecnologie:

- Coinvolgimento degli stakeholder;
- Supporto alla progettazione;
- Revisione della progettazione;
- Supporto alla costruzione;
- Gestione operativa;
- Formazione.

Lo studio ha condotto una serie di workshop e questionari esplorativi con la partecipazione di 54 esperti provenienti da 36 organizzazioni del mondo industriale e accademico. I risultati hanno mostrato che lo stato attuale dell'adozione di AR e VR nel settore edile non è affatto omogeneo. Le medie e piccole imprese sono notevolmente indietro rispetto alle grandi aziende che dispongono delle risorse per acquisire attrezzature e di team interni di sviluppo di contenuti e tecnologie.

L'articolo spiega per ogni caso d'uso presentato i punti di forza e i limiti dell'applicazione della realtà virtuale:

¹⁹ Il glTF (Graphics Language Transmission Format) è uno standard aperto e royalty-free per la trasmissione e il caricamento efficiente di scene e modelli 3D, definito spesso come il "JPEG del 3D".

²⁰ WebXR è uno standard web che consente esperienza immersive di realtà virtuale e aumentata direttamente all'interno dei browser, permettendo di accedere a dispositivi XR senza richiedere applicazioni native.

- **Coinvolgimento degli stakeholder:** sperimentando gli edifici in scala reale prima della costruzione, gli stakeholder, anche se privi di competenze tecniche, acquisiscono una comprensione più chiara della disposizione spaziale e dell'intento progettuale. Tuttavia, le sessioni di realtà virtuale richiedono spesso la supervisione da parte di personale informatico e sono limitate nell'accessibilità multiutente e nella condivisione dei contenuti.
- **Supporto alla progettazione:** la realtà virtuale aiuta i progettisti nelle prime fasi di progettazione consentendo l'esplorazione e la manipolazione delle configurazioni spaziali. Questa tecnologia facilita una comprensione più rapida degli aspetti spaziali qualitativi e semplifica la scelta tra le varie alternative progettuali. In questo campo, un importante limite risiede nella difficoltà a trasferire le modifiche apportate in VR ai modelli di progettazione tradizionale.
- **Revisione della progettazione:** le tecnologie VR migliorano la valutazione delle relazioni spaziali, la fattibilità e il comfort dell'utente. Gli ambienti immersivi aiutano la collaborazione multidisciplinare e il processo decisionale consentendo la sperimentazione diretta delle soluzioni progettuali. In questa fase i sistemi virtuali possono essere molto utili anche nell'individuazione delle interferenze agevolando il coordinamento delle varie discipline coinvolte nella progettazione. Persistono però delle difficoltà nella documentazione e archiviazione del feedback generato durante le revisioni basate su VR.
- **Supporto alla costruzione:** la realtà virtuale viene applicata per simulare sequenze di costruzione, monitorare i progressi e supportare le operazioni di cantiere. Queste applicazioni aiutano a identificare tempestivamente potenziali problemi e a ridurre i rischi, soprattutto in contesti pericolosi. I limiti includono latenza, efficienza ridotta rispetto alle operazioni fisiche e la complessità della gestione di rappresentazioni virtuali accurate e aggiornate.
- **Gestione operativa:** per le operazioni impiantistiche, le tecnologie immersive consentono l'ispezione da remoto, la pianificazione della manutenzione e la preparazione alle emergenze attraverso la realizzazione di ambienti virtuali collaborativi. Sebbene ciò permetta la simulazione di scenari anche complessi, l'integrazione con i sistemi di gestione esistenti e l'aggiornamento dei contenuti VR rimangono impegnativi.
- **Formazione:** l'applicazione VR consente agli utenti di provare in sicurezza attività complesse o pericolose in simulazioni realistiche. L'apprendimento basato su realtà virtuale aumenta il coinvolgimento e riduce i rischi, ma la sua adozione è limitata dai costi iniziali di sviluppo, dalla scarsa standardizzazione e dalla mancanza di metodi di valutazione convalidati.

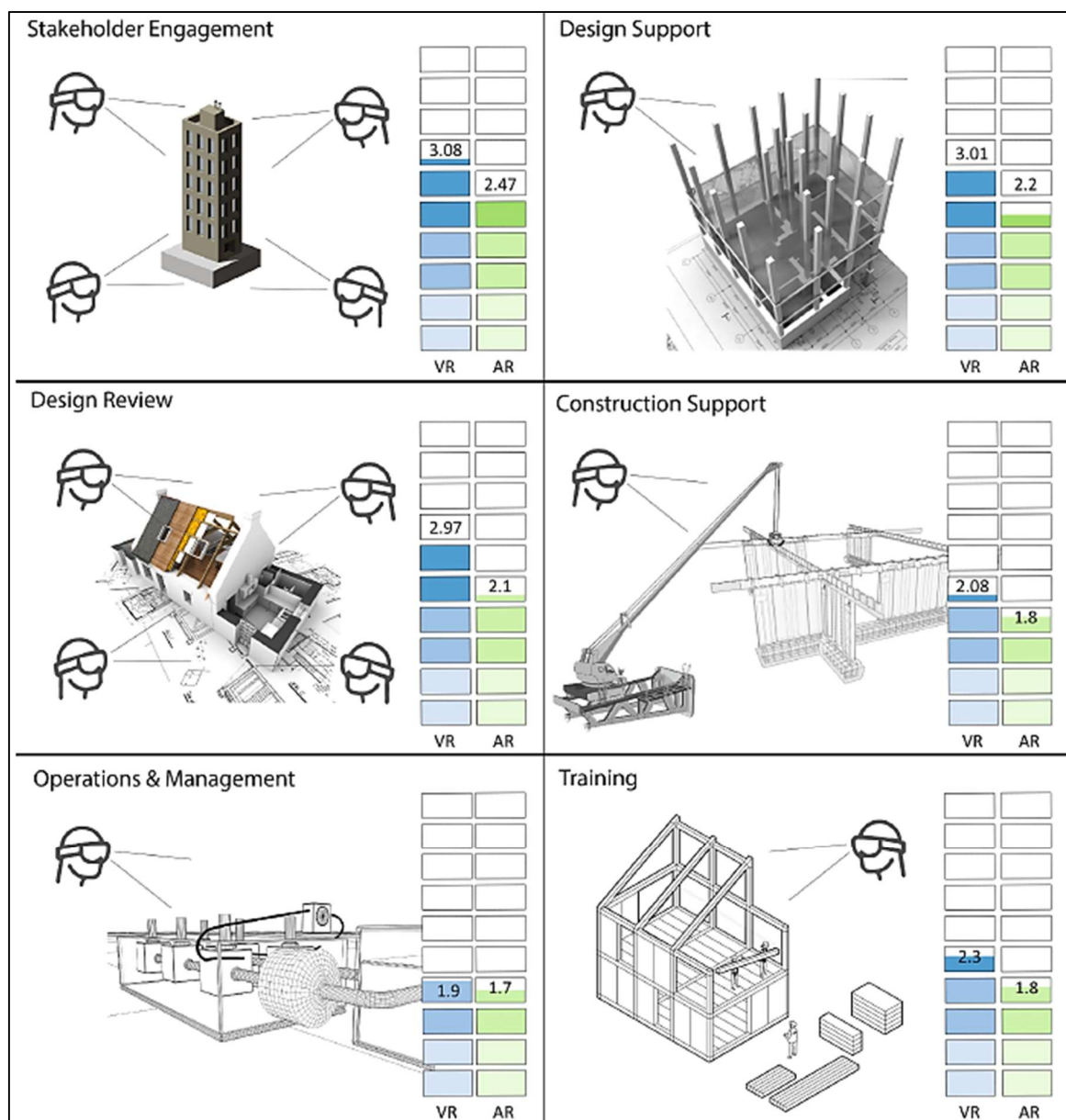


Figura 12 - Valutazioni dell'applicazione di AR e VR nei vari casi d'uso (Delgado et al., 2020)
 (1=non utilizzato, 2=testi iniziale, 3=implementazione di base, 4=parzialmente utilizzato, 5=completamente implementato)

Nel complesso, la realtà virtuale dimostra un forte potenziale come strumento di visualizzazione, valutazione esperienziale e comunicazione durante l'intero ciclo di vita di un progetto edile. I suoi principali punti di forza risiedono nella comprensione spaziale immersiva, nel coinvolgimento dell'utente e nella capacità di simulare scenari impraticabili o pericolosi nella realtà. Tuttavia, la sua adozione diffusa è limitata da vincoli tecnici, difficoltà di integrazione del flusso di lavoro e problematiche nella convalida e registrazione dei dati esperienziali. Pertanto, la VR è meglio intesa come uno

strumento complementare che migliora, piuttosto che sostituire, i processi di progettazione e costruzione consolidati.

Per quanto riguarda l'aspetto della revisione progettuale, la realtà virtuale trova un'importante applicazione nel supporto al processo di "decision making", ovvero la scelta tra le varie alternative possibili. Una ricerca condotta dalla Iowa State University nel 2016 ha voluto descrivere un caso studio sull'utilizzo della realtà virtuale immersiva come strumento di progettazione generale, con un focus sull'aspetto decisionale. Un gruppo di ingegneri è stato invitato a partecipare a tre revisioni di progettazione in un ambiente immersivo, per poi esporre i propri paperi e partecipare ad interviste e focus group sulla valutazione dell'utilizzo di questa interfaccia sulla valutazione delle alternative nella progettazione iniziale dell'opera. L'obiettivo di questo caso studio non si limitava a capire cosa possono fare gli utenti dal punto di vista tecnologico con strumenti VR, ma si è cercato anche di verificare in che modo le loro azioni nell'ambiente immersivo influenzano la definizione delle scelte progettuali. L'articolo spiega come i risultati mostrino in modo chiaro che il team ha identificato problematiche di progettazione e potenziali soluzioni che non erano state identificate o verificate utilizzando gli strumenti informatici tradizionali. Le osservazioni emerse dalle revisioni effettuate in VR sono state analizzate nella fase più avanzata della progettazione dell'opera, ottenendo ottimi risultati. Inoltre, i partecipanti hanno dichiarato che l'ambiente immersivo ha incoraggiato un maggiore senso di coinvolgimento degli attori coinvolti nell'esperienza, portando a discussioni più proficue e ad una completa partecipazione dei membri del team al processo decisionale. (Berg & Vance, 2016)

Lo sviluppo della realtà virtuale trova spazio anche nel mondo della ricerca, grazie al fatto di permettere osservazioni dettagliate, misurazioni precise del comportamento e manipolazioni ambientali sistematiche, specialmente in condizioni di laboratorio controllate. Studi sull'interazione uomo-ambiente, piuttosto che sulla vivibilità all'interno di edifici o sulla valutazione pre e post-occupazione degli stessi si prestano particolarmente all'utilizzo di strumenti virtuali. Per capire al meglio l'utilità e il potenziale campo di applicazioni della realtà virtuale, è necessario esaminare in che misura il comportamento, la cognizione e l'approccio degli utenti in ambienti virtuali siano analoghi a quelli nel mondo reale. Un articolo redatto nel 2015 per il journal "Computers Environment and Urban Systems" descrive un approccio multi-metodo che si basa su uno studio che indaga la corrispondenza tra l'esperienza in un centro congressi reale e quella in un modello immersivo altamente dettagliato dello stesso edificio, e allo stesso

tempo l'implementazione virtuale di un processo di riprogettazione sistematica del layout dell'opera esistente. Gli autori discutono il potenziale, i prerequisiti e le opportunità dell'utilizzo di ambienti virtuali come strumento di ricerca empirica nel campo dell'interazione uomo-ambiente. Sulla base dell'esperienza degli utenti che hanno partecipato allo studio, sono state riscontrate poche differenze significative tra le valutazioni dell'edificio reale e di quello virtuale. Tuttavia, sono emerse le limitazioni sensoriali delle tecnologie VR, che privilegiano il canale visivo rendendo l'esperienza molto simile alla realtà sotto il punto di vista delle valutazioni quantitative (percezione del layout, orientamento, comprensione degli spazi e delle funzionalità), ma risultano meno efficaci sul campo qualitativo. Ovviamente, un ambiente virtuale riduce e semplifica suoni ambientali e riverberi acustici e non può ricreare le sensazioni di temperatura, odori e texture tattili. L'atmosfera reale di un posto o di un edificio nasce dall'integrazione di tutti questi stimoli, oltre che dalla geometria o dai colori, mentre con modelli immersivi anche molto dettagliati la luce rimane simulata, le riflessioni dei materiali possono non essere del tutto realistiche e la dinamica del meteo e dell'ambientazione appare spesso finta e digitale. L'articolo conclude quindi che le differenze emerse tra l'edificio reale e quello virtuale non riguardano aspetti spaziali o funzionali, ma soprattutto le qualità atmosferiche dell'ambiente, legate alla percezione sensoriale ed emotiva dell'ambiente, che risultano parzialmente semplificate negli ambienti virtuali. Gli autori concludono sottolineano il forte potenziale della realtà virtuale come strumento di ricerca nello studio psicologico e architettonico della relazione uomo-ambiente e uomo-edificio. (Kuliga et al., 2015)

Dal punto di vista più pratico e applicativo strumenti di realtà aumentata e virtuale sono spesso utilizzati per la pianificazione e la gestione del cantiere, così come per formazione e sicurezza. Quest'ultima, infatti, è una delle principali preoccupazioni nel settore edile. Nonostante tutti i progressi e l'adozione di nuovi metodi, strumenti, attrezzature e normative, il tasso di incidenti, soprattutto quelli mortali, non sembra migliorare in modo significativo. L'International Labour Organization (ILO), agenzia specializzata delle Nazioni Unite che si occupa di promuovere la giustizia sociale e i diritti umani con particolare attenzione a quelli riguardanti il lavoro, ha stimato circa 60.000 incidenti mortali nei cantieri di tutto il mondo ogni anno, che significa una stima di 1 incidente ogni 9 minuti. Nel tentativo di ridurre questo numero, professionisti della sicurezza e ricercatori hanno esplorato nel tempo diversi modi innovativi per affrontare e risolvere il problema. Grazie a molti studi sull'argomento è emerso che una formazione continua ed efficace è in

grado di trasmettere conoscenze essenziali sulla sicurezza ai nuovi dipendenti e aggiornare le conoscenze di tutti i lavoratori in cantiere. Spesso le sessioni di formazioni vengono evitate o limitate dalle imprese a causa degli elevati fondi richiesti e dell'impegno in termini di tempo e logistica. Negli ultimi anni, l'adozione della realtà virtuale per la formazione sulla sicurezza ha ridotto l'impatto degli ostacoli e facilitato la continuità dell'aggiornamento professionale. Rokooei et al. (2023) cerca di valutare l'applicabilità delle tecnologie VR per i corsi sulla sicurezza, insieme alla percezione degli utenti di questo approccio innovativo, concentrandosi sul settore delle coperture poiché il progetto è stato sponsorizzato dalla principale organizzazione professionale per gli appaltatori di coperture negli Stati Uniti. Per questo studio sono stati sviluppati vari scenari immersivi tramite il motore di simulazione Unity²¹ e successivamente, attraverso l'interazione con esperti del settore, sono stati elaborati dei piani d'azione con lo scopo di integrare normative e istruzioni di sicurezza agli ambienti virtuali. I temi delle scene riguardano l'uso della scala e le attività principali sono:

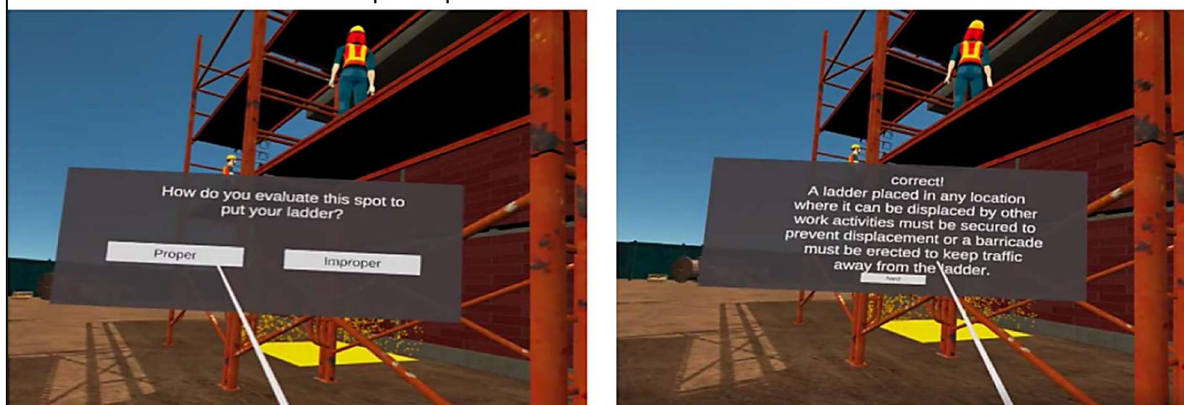
- Valutazione del luogo di lavoro per la migliore posizione della scala;
- Ispezione della scala per il controllo della presenza di grasso, fango, danni strutturali o parti mancanti;
- Installazione della scala;
- Fissaggio della scala;
- Mantenimento di un contatto sicuro con la scala;
- Utilizzo della scala per il trasporto di materiali;
- Smontaggio della scala dal tetto;
- Discesa e posizionamento della scala a terra;
- Ispezione sicura dei lavori in copertura;
- Caricamento della scala sul camion per un trasporto sicuro.

In ognuna di queste fasi l'utente diventa un operaio neoassunto addetto alla copertura del tetto che ha il compito di valutare le problematiche e i rischi per la sicurezza nei diversi scenari delle attività relative all'uso e alla mobilitazione della scala.

²¹ Unity è una piattaforma di sviluppo sviluppata da Unity Technologies, utilizzata per creare videogiochi 3D/2D, simulazioni e contenuti interattivi per PC, console, dispositivi mobili e realtà virtuale o aumentata.



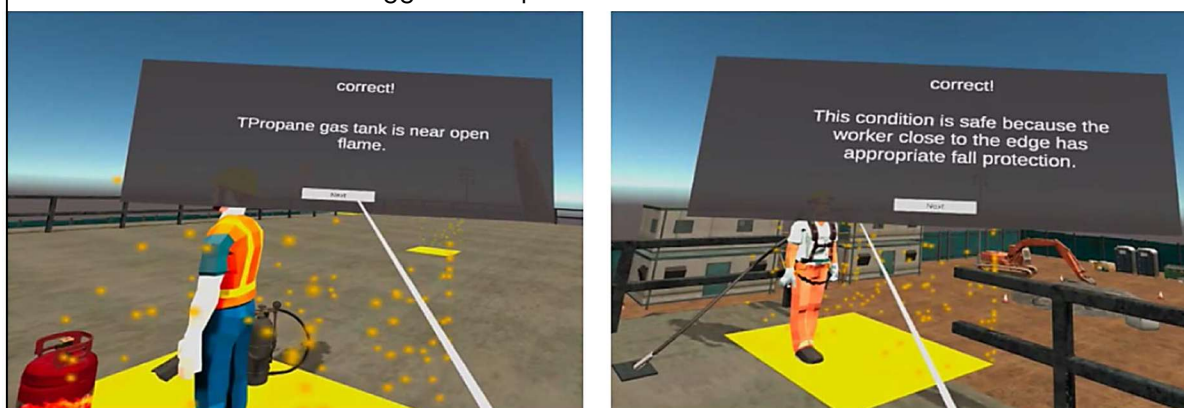
1. Esempio di posizionamento accettabile della scala



2. Esempio di posizionamento non accettabile della scala



3. Suggerimenti per l'installazione della scala



4. Suggerimenti sulle condizioni di lavoro in copertura

Figura 13 - Istantanee dell'interfaccia dell'applicazione VR (Rokooei et al., 2023)

Gli utenti che hanno testato l'applicazione VR sviluppata hanno poi fornito il proprio riscontro attraverso la compilazione di un questionario. Le domande presenti nel sondaggio riguardavano i principali contenuti relativi alla formazione sulla sicurezza tradizionale e all'applicabilità della tecnologia virtuale come strumento supplementare. I dati emersi dalle risposte fornite dai partecipanti al progetto sono stati combinati, ripuliti e codificati per ottenere un totale di 46 feedback idonei per l'analisi. La maggior parte dei soggetti selezionati era di sesso maschile, di età superiore ai 51 anni e con più di 25 anni di esperienza lavorativa nel settore delle costruzioni. Agli intervistati è stato chiesto di valutare la familiarità con la realtà virtuale in generale, quanto gli strumenti VR possano essere applicabili alla formazione della forza lavoro e se ritenessero che tale tecnologia potesse aiutare in modo significativo la nuova generazione di lavoratori ad acquisire le necessarie competenze sulla sicurezza.

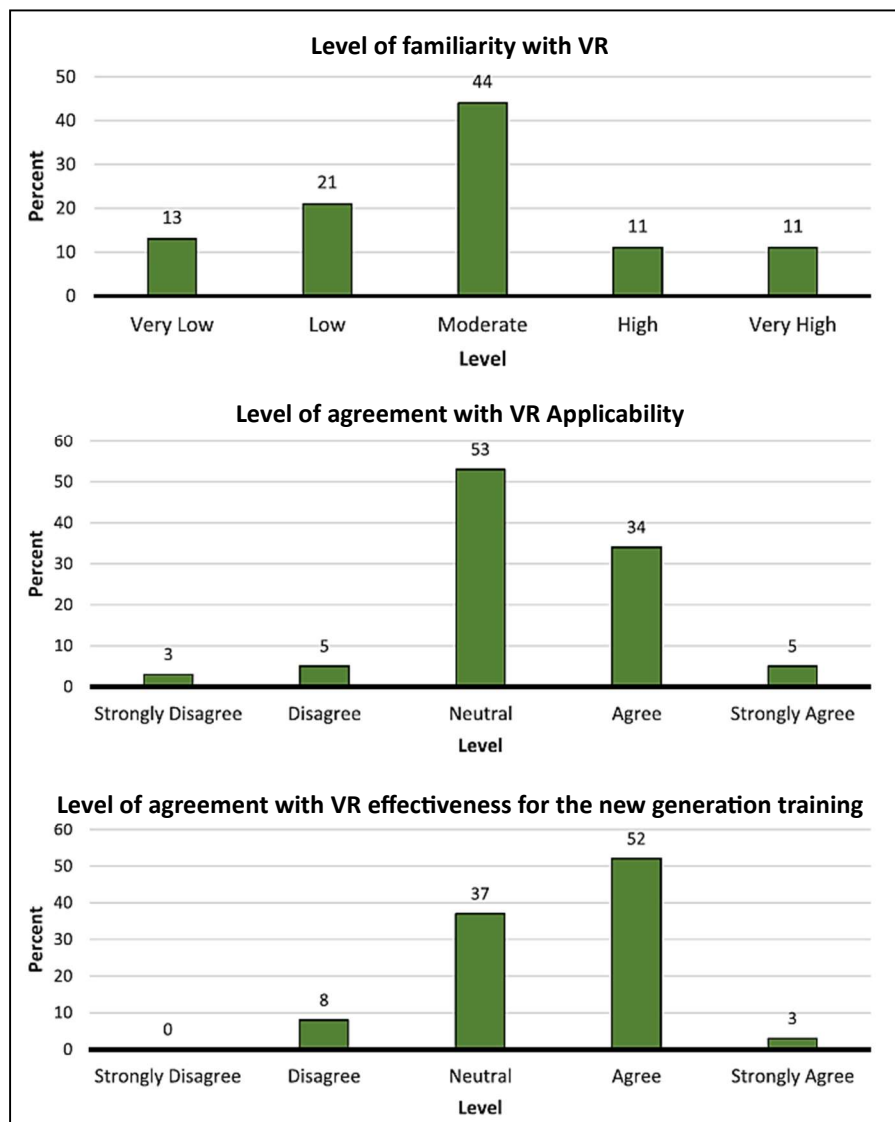


Figura 14 - Risposte dei partecipanti al sondaggio (Rokooei et al., 2023)

Dalle risposte del questionario risulta che il 34% degli utenti si trova favorevole all'applicazione della realtà virtuale nella formazione e gestione della sicurezza in cantiere, solo l'8% è in disaccordo e la maggioranza (53%) occupa una posizione neutrale a riguardo. Il 52% dei partecipanti dichiara inoltre di considerare la sua applicazione efficace per l'istruzione delle nuove generazioni. Infine, è stato anche chiesto di valutare le varie funzionalità degli strumenti VR e di specificare il principale ostacolo dell'adozione di massa di questa tecnologia nel settore delle coperture e dell'edilizia in generale. Da queste analisi è emerso che le funzionalità più apprezzate sono state la facilità d'uso, le istruzioni complete e dettagliate e le componenti audio e video stimolanti e realistiche, mentre la riluttanza dei consumatori e delle aziende a adottare la realtà virtuale è considerata l'ostacolo principale alla diffusione di questo tipo di approccio nel settore. Le conclusioni dello studio condotto da Rokooei et al. Spiegano che la realtà virtuale ha fornito un mezzo nuovo e innovativo per la formazione immersiva, particolarmente utile per la ricreazione di situazioni potenzialmente pericolose negli ambienti di costruzione e in grado di fornire uno spazio sicuro per l'istruzione dei lavoratori edili senza il timore delle conseguenze reali. Un aspetto favorevole è sicuramente quello economico dal momento che, superati i costi di sviluppo iniziale, la formazione in realtà virtuale risulta conveniente rispetto alla creazione di uno scenario reale. Questo rapporto di costi-benefici diventa ancora più evidente se si considera il numero di persone che possono utilizzare un'applicazione VR e la sua ripetibilità, anche da parte di uno stesso utente, senza costi aggiuntivi. I risultati del sondaggio mostrano una percezione relativamente positiva all'applicabilità della realtà virtuale in questo settore, nonostante rimanga ancora spazio per una maggiore consapevolezza. Dalle risposte fornite si evince che i leader del settore sembrano propensi all'utilizzo delle tecnologie VR nelle proprie aziende (45% favorevole, 44% neutrale). Di conseguenza i nuovi sviluppi della VR hanno già un mercato e possono essere utilizzati contemporaneamente per aumentare la consapevolezza e orientare la vasta popolazione neutrale verso un'opinione positiva sull'implementazione di questo strumento nella propria impresa.

Così come è estremamente utile per la gestione della sicurezza e della formazione, la realtà virtuale risulta applicabile anche nella pianificazione del layout di cantiere, attività cruciale che determina il successo del progetto. Molti professionisti ed esperti di project management nelle costruzioni ritengono che l'integrazione degli strumenti VR nell'organizzazione del cantiere sia un fenomeno gestionale prezioso e moderno per una

programmazione ottimale dei vari layout e spazi di lavoro. Risultati di studi condotti sull'implementazione delle tecnologie immersive nella pianificazione di cantiere, mostrano che i metodi bidimensionali tradizionali utilizzati per la definizione del layout sono meno dispendiosi in termini di tempo e più facili da gestire rispetto alle planimetrie 3D basate sulla realtà virtuale. Questo è dovuto a molteplici fattori, tra cui l'inesperienza degli utenti e la complessità dei diversi visori. Tuttavia è dimostrato che la comprensione e la valutazione di diversi scenari di cantiere e la capacità di rilevamento delle interferenze è più efficace se si adottano strumenti VR rispetto ai tradizionali modelli bi o tridimensionali. Inoltre utenti che hanno sperimentato questa tecnologia nel campo del project management affermano che l'analisi del sistema e del layout, seppur un po' più lenta, consente di anticipare la realtà delle condizioni e delle restrizioni del cantiere. Risulta infatti vantaggioso per i progettisti utilizzare planimetrie tridimensionali sviluppate tramite VR per migliorare l'efficienza delle attività di organizzazione degli spazi di lavoro. Un approccio mirato a questo tipo di visualizzazione può aiutare i responsabili di cantiere a comprendere la disposizione di cantiere, fornendo loro un'illustrazione più dettagliata e realistica delle planimetrie. (Muhammad et al., 2020)



Figura 15 - Esempio di interfaccia VR applicata alla gestione del cantiere (LuminousXR)

Dal punto di vista della progettazione sanitaria, le applicazioni della realtà virtuale offrono notevoli vantaggi e agevolazioni. Nel campo ospedaliero la ricerca mira a identificare caratteristiche degli spazi e degli ambienti che migliorino il senso di rigenerazione e guarigione dei pazienti, con l'obiettivo di supportare la realizzazione di strutture sanitarie adeguate e improntate sul benessere degli utenti. Nel 2025, un articolo del "International Journal of Environmental Research and Public Health" ha indagato come stimoli basati sia su schermo che su realtà virtuale possano aiutare la valutazione degli ambienti sanitari con lo scopo di selezionare le migliori scelte progettuali per rendere gli spazi ospedalieri adatti al percorso di riabilitazione e al benessere dei pazienti. Le variabili chiave analizzate includevano l'accesso alla vista tramite finestra, il contenuto della vista, la materialità e la geometria della stanza. I risultati di questo studio indicano che le prestazioni della realtà virtuale hanno in generale prodotto punteggi più elevati, o nel peggiore dei casi uguali, rispetto alle presentazioni basate su schermo. Ciò significa che tramite l'osservazione immersiva si riesce ad analizzare in modo più preciso e attento il reale effetto che le caratteristiche degli ambienti interni di un ospedale o di un edificio sanitario possono avere sugli utenti. In generale, si è potuto osservare che le finestre più ampie hanno ottenuto valutazioni più positive in entrambe le modalità di visualizzazione, le viste sull'acqua sono state ritenute le più rigeneranti seguite dalle aree boschive, i materiali naturali sono stati preferiti ad altre tipologie di finiture, in particolare con l'utilizzo dei sistemi VR, ed è stata anche apprezzata la varietà dei soffitti, soprattutto quelli a volta, rispetto ai classici soffitti piani. Questa ricerca sottolinea il potenziale della tecnologia VR per simulare e valutare interventi di interior design, offrendo spunti per la creazione di ambienti rigenerativi, terapeutici, più efficaci e personalizzati nelle strutture sanitarie. (Tural & Tural, 2025)

I risultati della progettazione sanitaria dovrebbero soddisfare gli standard dei team di professionisti e degli stakeholder del settore medico. Tuttavia, le incomprensioni che si verificano durante la comunicazione tra gli attori coinvolti quando si utilizzano illustrazioni bidimensionali portano alla necessità di rielaborare il progetto, spesso anche più volte e in diverse fasi. Per superare questa problematica, alcuni ricercatori hanno proposto sistemi di comunicazione e simulazione basati su BIM e VR, che sono in grado di supportare database e sono integrati a motori di gioco e tecnologie immersive per il design ospedaliero in ambienti semi-immersivi. Queste piattaforme sono un efficiente sistema di comunicazione visiva per la progettazione sanitaria. La loro applicazione non si limita a migliorare l'efficienza del dialogo all'interno del team di lavoro ma permette

anche di facilitare le interazioni visive e il processo decisionale. La pianificazione di ambienti medici necessita di particolari attenzioni e precauzioni, vista l'importanza del servizio offerto dall'opera finita. Edifici di questo tipo, inoltre, sono caratterizzati da una fitta rete di impianti classici, ospedalieri e di emergenza che devono essere in grado di funzionare allo stesso momento in modo perfettamente coordinato e anche in scenari estremi. In un ambito così delicato, l'uso efficace dell'integrazione delle tecnologie BIM e VR può aiutare notevolmente i team di progettazione ospedaliera e le parti interessate a gestire in modo sistematico il lavoro. (Lin et al., 2018)

In questo contesto, la realtà virtuale si sta sempre di più affermando come un efficace strumento di supporto per la valutazione e la comunicazione di soluzioni spaziali complesse e con importanti criticità da gestire. Consentendo l'esplorazione immersiva degli ambienti clinici, i sistemi VR facilitano la valutazione di layout, flussi di lavoro ed esperienza utente nelle fasi iniziali della progettazione, contribuendo a decisioni più consapevoli ed efficaci. Sebbene le applicazioni attuali rimangano principalmente incentrate sulla visualizzazione qualitativa, il crescente utilizzo della realtà virtuale nei progetti sanitari ne evidenzia il potenziale come strumento complementare ai metodi di progettazione tradizionali, in particolare in ambienti in cui l'efficienza funzionale e la sicurezza sono di fondamentale importanza.

1.3. Integrazione tra BIM e VR

1.3.1. Applicazioni nella progettazione

Il settore dell'architettura, dell'ingegneria e delle costruzioni (AEC) è sempre impegnato nell'utilizzo e nella scoperta di nuove risorse per rendere efficienti e funzionali anche i processi più complessi. Negli ultimi anni la necessità di una trasformazione digitale ha subito un notevole incremento. In questo ambito sicuramente si sono fatti spazio le tecnologie di realtà virtuale e i visori HDM (Head-Mounted Display), ovvero i dispositivi di visualizzazione immersiva indossabili sulla testa. Allo stesso tempo il Building Information Modeling è ormai riconosciuto come strumento indispensabile per la progettazione contemporanea, soprattutto se si tratta di commesse complesse o sensibili, come nel caso di un edificio ospedaliero. Il pieno potenziale di questa metodologia però non è ancora stato sfruttato del tutto, probabilmente a causa di alcune barriere che devono ancora essere superate sia dal punto di vista tecnologico che gestionale. Una di queste

è sicuramente la comunicazione e collaborazione tra le fasi di progettazione, costruzione, gestione e manutenzione. In questo contesto gli strumenti VR possono risultare molto utili per colmare le lacune e fornire funzionalità aggiuntive. (Safikhani et al., 2022)

Dall'analisi della letteratura e dalle ricerche svolte negli ultimi tempi risultano tre categorie principali che definiscono l'applicazione integrata di BIM e VR:

- Istruzione e formazione;
- Progettazione e scambio di dati;
- Gestione del progetto e collaborazione.

Per quanto riguarda la formazione e l'istruzione, gli ambienti immersivi di realtà virtuale consentono agli studenti di interagire direttamente con modelli BIM, riuscendo a migliorarne la comprensione spaziale e quella progettuale. Inoltre, il coinvolgimento cognitivo, rispetto alle tradizionali rappresentazioni bi o tri-dimensionali basate su schermo, risulta notevolmente più stimolante. Gli studi mostrano che le tecnologie immersive possono supportare sia la formazione accademica che quella professionale, semplificando l'assimilazione dei concetti BIM più complessi, favorendo l'apprendimento esperienziale e consentendo agli utenti di esplorare sistemi edilizi complessi su larga scala. (Getuli et al., 2020)

Dal punto di vista progettuale, l'integrazione della realtà virtuale nei flussi di lavoro BIM migliora significativamente la valutazione del modello, il processo decisionale e il sistema di scambio dati. Le tecnologie immersive permettono alle parti interessate di "entrare" all'interno dell'edificio ancor prima della sua stessa costruzione, consentendo una revisione in tempo reale della qualità spaziale, della realizzabilità e delle alternative progettuali. Uno dei principali punti di forza della metodologia BIM è sicuramente la possibilità di unire la rappresentazione geometrica e spaziale delle opere in progetto con un database di informazioni e parametri di ogni tipo, che descrivono l'edificio e le sue caratteristiche e che permettono di eseguire test, simulazioni o analisi dettagliate sul modello. Talvolta però l'esposizione o la configurazione di questi dati non è immediata, ma richiede una conoscenza profonda dei concetti di modellazione e dei software utilizzati. A questo proposito, la realtà virtuale può intervenire semplificando lo scambio e l'interpretazione dei dati BIM, migliorando l'accuratezza della visualizzazione e riducendo il carico cognitivo. Le sue applicazioni includono la modellazione interattiva,

la simulazione di sistemi meccanici, elettrici e idraulici (MEP²²) e l'integrazione di dati di scansione laser e fotogrammetria. (Du et al., 2018)

Il BIM basato sui sistemi VR svolge un ruolo sempre più fondamentale anche nella gestione dei progetti e nei processi collaborativi lungo l'intero ciclo di vita di un edificio. Attraverso ambienti immersivi e interattivi la comunicazione tra team multidisciplinari risulta agevolata e allo stesso tempo è più immediato individuare i conflitti e valutare le sequenze di costruzione in modo collaborativo. Nel project management, le applicazioni di queste tecnologie includono la pianificazione della costruzione, il monitoraggio dell'avanzamento lavori, la visualizzazione degli spazi e la gestione delle strutture. (Lee et al., 2022)

In generale la letteratura evidenzia che la collaborazione tra BIM e realtà virtuale migliora la trasparenza, il coinvolgimento delle parti interessate e le prestazioni complessive del progetto, sebbene permangano sfide legate all'interoperabilità, ai requisiti hardware e all'integrazione del flusso di lavoro (Safikhani et al., 2022).

L'applicazione della realtà virtuale integrata alla metodologia BIM al caso studio preso in esame, l'ospedale ASL TO 5 di Cambiano, il cui progetto verrà approfondito nel Capitolo 2, risulta particolarmente significativa sotto due punti di vista principali:

- la revisione del progetto e il coordinamento delle discipline;
- la presentazione del progetto attraverso scene immersive.

Nel paragrafo successivo verranno analizzati i vantaggi offerti da questo tipo di approccio nella progettazione, con particolare riferimento alle fasi iniziali del processo edilizio.

1.3.2. BIM e VR nella revisione e presentazione del progetto

Nella fase più preliminare del processo edilizio, ovvero il progetto di fattibilità tecnico economica (PFTE), sono fondamentali le operazioni di rilevamento delle interferenze tra le varie discipline coinvolte e la presentazione degli spazi e delle scelte progettuali effettuate. In Italia *"la progettazione in materia di lavori pubblici, si articola in due livelli di successivi approfondimenti tecnici: il progetto di fattibilità tecnico-economica e il progetto definitivo"* (Decreto Legislativo 31 marzo 2023, n. 36, art. 41). In particolare, il

²² L'acronimo MEP (Mechanical, Electrical and Plumbing) nel contesto edilizio indica l'insieme degli impianti meccanici, elettrici e idrico-sanitari di un edificio.

primo livello *“costituisce lo sviluppo progettuale della soluzione che, tra le alternative possibili messe a confronto [...] presenta il miglior rapporto tra costi complessivi da sostenere e benefici attesi per la collettività”* (Decreto Legislativo 31 marzo 2023, n. 36, Allegato I.7, art. 6). Nei commi 1 e 2 dell’articolo 43 del decreto legislativo 36/2023 vengono inoltre chiariti i metodi e gli strumenti di gestione informativa digitale delle costruzioni:

“1. A decorrere dal 1° gennaio 2025, le stazioni appaltanti e gli enti concedenti adottano metodi e strumenti di gestione informativa digitale delle costruzioni per la progettazione e la realizzazione di opere di nuova costruzione e per gli interventi su costruzioni esistenti con stima del costo presunto dei lavori di importo superiore a 2 milioni di euro. [...]

2. Anche al di fuori dei casi di cui al comma 1 [...], le stazioni appaltanti e gli enti concedenti possono adottare metodi e strumenti di gestione informativa digitale delle costruzioni, eventualmente prevedendo nella documentazione di gara un punteggio premiale relativo alle modalità d’uso di tali metodi e strumenti.”

Per gestione informativa digitale si intende proprio l’utilizzo della metodologia BIM e la realizzazione di modelli tridimensionali parametrici per la progettazione. Risulta quindi evidente che per un progetto pubblico di grandi dimensioni e complessità, come quello di un ospedale, è ormai obbligatorio l’utilizzo di questi sistemi per l’organizzazione, lo scambio e la presentazione dei dati.

In relazione a quanto stabilito dal comma 1 dell’articolo 43 del D.Lgs 36/2023, il caso studio analizzato ricade nell’ambito di applicazione dell’obbligo di adozione dei metodi e strumenti di gestione informativa digitale, in quanto l’intervento presenta un importo dei lavori superiore alla soglia di 2 milioni di euro. Inoltre, il progetto dell’ospedale di Cambiano è attualmente alla fase di PFTE.

In questo livello preliminare del procedimento edilizio, è fondamentale il coordinamento tra le discipline coinvolte. Infatti, in uno stadio iniziale le scelte progettuali sono le protagoniste del processo e dovranno diventare la base dell’opera finita. Risulta quindi indispensabile la gestione delle problematiche che possono sorgere tra la progettazione architettonica, quella impiantistica e quella strutturale. Da un punto di vista tecnico e di operabilità l’analisi delle interferenze può essere svolta tramite software tradizionali, come Autodesk Naviswork²³, che sono in grado di evidenziare i punti del modello dove si

²³ Autodesk Navisworks è un software di revisione, coordinamento e simulazione tridimensionale per progetti AEC (Architettura, Ingegneria, Costruzioni), utilizzato per unificare file di diverse discipline in un unico modello federato.

intersecano geometrie o si riscontrano problemi di qualsiasi tipo tra elementi appartenenti a file di diverse discipline. Sicuramente questo tipo di controllo sistematico è molto importante e utile soprattutto in una fase più avanzata, ovvero quella in cui le scelte progettuali sono ormai ben definite e bisogna intervenire esclusivamente sugli errori di modellazione e le eventuali lacune o mancanze del modello digitale. Invece, in una fase come quella di progetto di fattibilità tecnico economica molte delle decisioni fondamentali del progetto devono ancora essere effettuate. Per fare ciò non è sufficiente individuare i punti in cui si creano le interferenze tra i modelli specialistici, ma è anche necessaria la correzione degli errori di progettazione e la definizione di una soluzione più adatta nel gestire la contemporaneità delle operazioni impiantistiche, del layout architettonico e della stabilità strutturale.

La realtà virtuale offre un considerevole aiuto in questa fase progettuale, consentendo ai professionisti coinvolti nelle diverse attività di osservare le interferenze trovate dalla clash detection da vicino e in un ambiente che simula la realtà, quindi ad una scala 1:1, da tutte le angolazioni possibili e in relazione agli altri elementi presenti nello spazio. In termini operativi, questa analisi consente di verificare che i vari componenti del progetto non entrino in conflitto tra loro, individuando:

- Interferenze geometriche (collisioni fisiche tra gli elementi);
- Interferenze funzionali (spazi di manutenzione, accessibilità, raggi di apertura);
- Interferenze temporali (legate alle fasi costruttive, nel caso di modelli 4D).

Soprattutto per quanto riguarda le criticità geometriche e funzionali, l'impiego della realtà virtuale a supporto della clash detection può risultare efficace rispetto ai metodi di revisione tradizionali. Attraverso l'esportazione degli elementi spaziali e fisici modellati in ambiente BIM e la loro integrazione in software di visualizzazione immersiva, come VRex, è possibile analizzare in maniera più intuitiva e immediata le interferenze tra i diversi componenti progettuali. Molte piattaforme immersive consentono inoltre la connessione simultanea di più stakeholder e professionisti all'interno dello stesso ambiente virtuale. In questo modo è possibile effettuare delle riunioni tra i diversi team che partecipano al lavoro, anche a distanza e direttamente nel contesto immersivo tramite l'utilizzo degli appositi visori. Tutti gli attori coinvolti vedranno allo stesso tempo le problematiche di progettazione o modellazione, potranno discutere sulla loro risoluzione e trovare le soluzioni più adatte ed efficienti per tutte le discipline.

Nel caso di edifici complessi e altamente specializzati come le strutture ospedaliere, il controllo accurato del corretto posizionamento degli impianti assume un'importanza ancora maggiore. Tali sistemi devono garantire piena operatività anche in condizioni di emergenza, rendendo indispensabile una progettazione coordinata e priva di interferenze tra componenti strutturali, architettonici e impiantistici. In questo contesto, la partecipazione congiunta di tutte le figure professionali coinvolte nel processo di revisione risulta non solo auspicabile, ma strategica. Perché un ospedale sia funzionale e consenta al personale medico che ci lavora di compiere le attività di propria competenza, da quelle più abituali a quelle straordinarie e complesse, come le operazioni di urgenza, tutti gli aspetti impiantistici devono essere studiati nei minimi dettagli e i componenti dei diversi ambiti non devono intaccare in alcun modo le altre funzionalità tecniche o gli elementi presenti. L'analisi di modelli tridimensionali su schermo o di elaborati grafici tradizionali può talvolta non rendere pienamente percepibili alcune criticità spaziali. La visualizzazione immersiva, invece, consente una comprensione più realistica delle relazioni dimensionali e delle interferenze, facilitando l'individuazione dei punti critici e supportando eventuali modifiche progettuali.

In una fase di Progetto di Fattibilità Tecnico Economica, molte delle scelte progettuali devono ancora essere effettuate e trovano in questo livello il momento migliore per essere definite e approfondite nel dettaglio. Dietro al processo decisionale del layout, della collocazione degli impianti, delle soluzioni tecnologiche e delle dimensioni strutturali di un ospedale ci sono numerose regole, norme e linee guida da seguire. Tuttavia, oltre alla parte prettamente tecnica della progettazione sanitaria, in questa fase emergono anche gli aspetti legati alla vivibilità e al comfort interno degli spazi dedicati alle attività mediche. In un ospedale risulta di vitale importanza che la progettazione degli spazi sia pensata per essere il più funzionale possibile e per garantire al personale sanitario di svolgere il proprio lavoro in modo fluido e operativo. Vista l'importanza dei servizi offerti dall'opera finita le scelte effettuate durante il processo di definizione e dimensionamento del layout e degli spazi devono essere mirate e puntuali. Per arrivare alla soluzione migliore è necessario rivolgersi alle persone che dovranno lavorare o essere ricoverate nell'edificio una volta realizzato. Il supporto alla progettazione da parte del personale medico e di potenziali pazienti è fondamentale e se sfruttato nel modo giusto può essere uno strumento molto potente. Il problema principale della pianificazione partecipata è la difficoltà nel comunicare la tridimensionalità e la distribuzione spaziale di un ambiente a personale privo di

competenze tecniche e ingegneristiche. Spesso fare ciò risulta impossibile se ci si limita all'utilizzo di disegni bidimensionali, tavole di progetto o presentazioni di modelli digitali su monitor. In questo contesto la realtà virtuale rappresenta un elemento di svolta nel processo di visualizzazione del progetto. Infatti, essa permette agli utenti di immergersi in ambienti realistici che non lasciano spazio all'interpretazione o all'immaginazione. Ciò che si osserva è esattamente ciò che è stato progettato e modellato. La più grande innovazione introdotta dagli strumenti VR è la possibilità di interagire con gli elementi del modello e simulare soluzioni alternative per quanto riguarda l'arredamento, gli elementi architettonici, gli strumenti medici o i terminali impiantistici.

Quando un professionista sanitario entra in un ambiente di realtà virtuale immersiva, il processo di progettazione passa dalla valutazione astratta alla simulazione incarnata. Per esempio, all'interno di uno spazio virtuale che rappresenta una sala operatoria, il medico può replicare i gesti e i movimenti eseguiti durante procedure chirurgiche, valutando se le distanze spaziali sono adeguate, se le apparecchiature sono posizionate correttamente e se le dimensioni minime di lavoro sono effettivamente rispettate. A differenza della tradizionale verifica basata su planimetrie o presentazioni digitali su monitor, la realtà virtuale consente all'utente di percepire scala, proporzionalità ed ergonomia con un rapporto realistico uno a uno, rivelando potenziali vincoli che potrebbero passare inosservati nei disegni o nelle viste 3D statiche. Il medico può anche fornire un riscontro informato sulle condizioni di illuminazione, sia in termini di intensità che direzionalità, nonché sui materiali selezionati per le finiture, valutando aspetti come la riflettività, la percezione igienica e il comfort visivo.

Estendendo la simulazione immersiva all'intero reparto, l'utente può navigare nei corridoi e testare i modelli di circolazione in tempo reale. Ciò consente di verificare se i percorsi di emergenza sono funzionali, chiaramente separati dai flussi dei pazienti e intuitivamente leggibili in termini di orientamento. Mentre una planimetria può rendere le distribuzioni immediatamente comprensibili, l'orientamento spaziale in una struttura sanitaria complessa può variare significativamente se sperimentato su scala umana. Senza una verifica immersiva, esiste il rischio concreto di progettare un layout che funziona sulla carta ma risulta disorientante o labirintico nella pratica.

Se l'utente della realtà virtuale possiede competenze mediche o sanitarie e gli viene data la possibilità di interagire direttamente con l'ambiente, per esempio spostando pareti, regolando tramezzi, riposizionando mobili, modificando controsoffitti o riconfigurando le aperture delle porte, il sistema diventa uno strumento di supporto alla progettazione

mirato e operativo. In questo scenario, la realtà virtuale trascende il suo ruolo di mero mezzo di visualizzazione e diventa una piattaforma decisionale attiva. La progettazione non si limita più alla definizione di geometrie e vincoli dimensionali; si evolve invece in un processo partecipativo e iterativo che coinvolge in modo significativo i professionisti che opereranno all'interno della struttura. Integrando le conoscenze cliniche direttamente nella convalida spaziale, il progetto acquisisce precisione funzionale, contribuendo in ultima analisi alla creazione di ambienti sanitari più sicuri ed efficienti, spazi progettati non solo per soddisfare gli standard tecnici, ma anche per supportare i professionisti medici nel salvare vite umane.

Questa logica partecipativa e immersiva può essere efficacemente estesa alla progettazione dei reparti di degenza ospedaliera. In questo contesto, il feedback più significativo viene fornito non solo da medici e stakeholder tecnici, ma soprattutto dai potenziali utenti finali degli spazi: pazienti e persone ricoverate. Attraverso l'integrazione di modelli BIM in ambienti di realtà virtuale interattivi, diventa possibile sviluppare scene immersive su misura per diversi blocchi ospedalieri, come reparti di chirurgia, unità di terapia intensiva o subintensiva, reparti di maternità, reparti pediatrici, unità psichiatriche e ambienti di assistenza geriatrica. Ogni tipologia presenta requisiti funzionali, emotivi e percettivi specifici che non possono essere valutati in modo completo e trasparente attraverso disegni convenzionali o rendering statici. Sperimentando questi spazi a grandezza naturale in VR, gli utenti possono valutare quando l'ambiente sia di supporto, rassicurante e favorevole alla guarigione.

La ricerca sulla progettazione sanitaria supporta l'idea che gli ambienti fisici influenzino significativamente i risultati dei pazienti. Ad esempio, uno studio del 2025 pubblicato sulla rivista *Healthcare*, ha applicato la Teoria dell'Assistenza Umana di Watson²⁴ a pazienti sottoposti a operazioni cardiocirurgiche e ha dimostrato che adattamenti ambientali mirati, come illuminazione ottimizzata, temperatura e umidità controllate, comfort acustico e qualità spaziale complessiva, sono associati a una migliore qualità del sonno, a una riduzione dei livelli di ansia e depressione e a un miglioramento delle condizioni generali di recupero dopo l'intervento. Questi risultati confermano che l'ambiente costruito svolge un ruolo terapeutico attivo, non solo funzionale e passivo. L'esposizione a fattori di supporto, tra cui una luce adeguata, una riduzione del rumore e un senso di pulizia e ordine, contribuisce alla stabilità emotiva e al recupero fisiologico.

²⁴ La Teoria dell'Assistenza Umana (Human Caring) di Jean Watson è un modello infermieristico filosofico e scientifico che pone al centro la relazione transpersonale tra infermiere e paziente

Di conseguenza, i pazienti hanno maggiore probabilità di riprendersi efficacemente quando sono circondati da ambienti sani, rigenerativi e psicologicamente favorevoli che favoriscono la riabilitazione durante il ricovero. La progettazione sanitaria deve quindi considerare attentamente soluzioni estetiche, tecnologiche e ambientali, non solo per soddisfare gli standard normativi e funzionali, ma anche per promuovere attivamente il benessere. I materiali selezionati, i sistemi di illuminazione, i trattamenti acustici, le proporzioni spaziali, le palette cromatiche e l'integrazione di elementi biofilici contribuiscono a plasmare l'esperienza psicologica e fisiologica dei pazienti.

In molti casi, gli anziani o i ricoverati con condizioni di salute precarie potrebbero non essere in grado di comprendere appieno il comfort visivo e funzionale di una stanza attraverso la sola osservazione di planimetrie, prospetti o rendering fotorealistici. Invece, immersi in un ambiente virtuale che simula la reale esperienza di ospedalizzazione, possono fornire un parere diretto e pratico, riportando come si sentono nello spazio, se percepiscono un senso di accoglienza o oppressione, cosa sembra mancare e quali elementi aumenterebbero la sensazione di comfort e sicurezza.

Inoltre, grazie alla possibilità di manipolazione interattiva dell'ambiente virtuale, gli utenti possono testare layout alternativi, modificare la disposizione degli arredi, sperimentare diverse intensità di illuminazione, modificare gli schemi cromatici e interagire con elementi chiave, tra cui le apparecchiature mediche, i letti e i dispositivi di emergenza. Questa capacità interattiva consente una valutazione comparativa di molteplici scenari progettuali in tempo reale, supportando decisioni più consapevoli e incentrate sul paziente.

Integrando il feedback dei pazienti fin dalle prime fasi del processo di progettazione, le strutture sanitarie possono evolversi da semplici spazi di trattamento a veri e propri ambienti di cura. Invece di progettare stanze standardizzate, architetti e ingegneri possono plasmare ambienti su misura che rispondano alle esigenze emotive, cognitive e fisiche di specifici gruppi di pazienti. Considerando che molti utenti ospedalieri sperimentano già ansia, disagio o stress emotivo durante il ricovero, l'ambiente costruito dovrebbe almeno contribuire a rendere la loro degenza il più possibile di supporto, rassicurante e piacevole.

In questo senso, il processo integrato BIM-VR non si limita ad essere un miglioramento tecnologico del flusso di lavoro di progettazione, ma diventa un vero e proprio strumento

strategico per un'architettura sanitaria incentrata sulla persona, in grado di trasformare i reparti di degenza in ambienti che partecipano attivamente al percorso di cura.

In definitiva, la convergenza di BIM e VR nella revisione e presentazione dei progetti dovrebbe essere intesa non solo come un miglioramento tecnologico, ma come un'evoluzione metodologica nella progettazione sanitaria. Il valore degli ambienti immersivi risiede nella loro capacità di sintetizzare rigore tecnico ed esperienza umana in un unico quadro valutativo. Collegando verifica analitica e percezione vissuta, il processo BIM-VR supporta una visione progettuale più consapevole e responsabile, in cui le decisioni spaziali sono convalidate non solo per conformità e coordinamento, ma anche per il loro impatto sulla pratica medica quotidiana e sul benessere del paziente. In questa prospettiva, la revisione immersiva diventa uno strumento con un preciso scopo: allineare l'intento progettuale con la funzionalità clinica, la qualità architettonica con il comfort emotivo e l'innovazione tecnologica con le reali esigenze umane.

2. Struttura metodologica e contesto sperimentale

Basandosi sui fondamenti teorici delineati nel capitolo precedente, che ha esaminato criticamente le metodologie BIM, le tecnologie immersive e la loro integrazione nel processo di progettazione, questa sezione segna una transizione decisiva dall'analisi concettuale alla ricerca applicata. Mentre lo stato dell'arte ha fornito il quadro interpretativo necessario per comprendere il potenziale e i limiti dell'integrazione BIM-VR, il capitolo seguente traduce tali considerazioni teoriche in una strategia operativa strutturata. L'attenzione si sposta quindi dalla discussione basata sulla letteratura alla definizione di un approccio metodologico concreto, specificamente concepito per implementare e testare l'integrazione BIM-VR in un ambiente di progettazione reale.

Il quadro metodologico sviluppato per questa ricerca viene presentato in dettaglio, illustrando il flusso di lavoro strutturato che governa la trasformazione di modelli BIM multidisciplinari in ambienti virtuali immersivi. Il processo comprende la modellazione coordinata, lo scambio di dati, la gestione dell'interoperabilità, il rilevamento immersivo delle interferenze, la correzione iterativa del modello e lo sviluppo di scene interattive per la validazione spaziale. Ogni fase è concepita come parte di un sistema sequenziale, in cui la coerenza e la tracciabilità delle informazioni vengono mantenute durante la transizione digitale dalle piattaforme di BIM authoring²⁵ agli ambienti di visualizzazione in tempo reale. Invece di realizzare un costrutto puramente teorico, il flusso di lavoro è stato progettato, adattato e calibrato in relazione al caso studio selezionato, garantendo l'allineamento tra procedure tecniche, scala dell'opera e requisiti prestazionali.

Il Nuovo Ospedale di Cambiano viene quindi presentato non solo come caso descrittivo, ma come contesto sperimentale in cui viene applicata e validata la procedura BIM-VR proposta. La sua fase di progettazione, la sua complessità e i vincoli spaziali specifici dell'assistenza sanitaria lo rendono particolarmente adatto per testare strategie di coordinamento, analisi immersive delle interferenze e approcci di progettazione partecipata. Le aree selezionate per l'analisi integrata, ovvero il blocco operatorio e il reparto di degenza, fungono da ambienti rappresentativi attraverso i quali è possibile valutare sia il coordinamento tecnico che la valutazione spaziale incentrata sull'utente.

²⁵ Per BIM authoring si intende l'attività di creazione, modellazione e gestione del modello informativo tramite un software BIM dedicato.

2.1. Caso studio: Ospedale di Cambiano

Il capitolo seguente si propone di presentare il progetto utilizzato come caso di studio per l'applicazione simultanea della metodologia BIM e della realtà virtuale nelle varie fasi del processo di progettazione edile.

Si tratta del progetto di fattibilità tecnico economica (PFTE) per la realizzazione del "Nuovo Ospedale ASL TO5²⁶" di Cambiano (TO). Quest'ultimo sostituirà le realtà territoriali esistenti delle strutture sanitarie presenti a Chieri, Moncalieri e Carmagnola creando un unico centro di eccellenza con tutte le specialità e le funzioni previste per gli ospedali spoke²⁷ con DEA di I livello²⁸, così come definiti dal D.M. 70/2015 (regolamento recante definizione degli standard qualitativi, strutturali, tecnologici e quantitativi relativi all'assistenza ospedaliera), dalla DGR n. 1-600 del 19 novembre 2014 e dalla DGR n. 1-924 del 23 gennaio 2015, che definisce i criteri a cui ricondurre l'attività ospedaliera delle ASL.



Figura 16 - Aerofotogrammetrico, area di intervento (Technicaer Engineering S.r.l.)

²⁶ ASL TO5 è l'Azienda Sanitaria Locale di Carmagnola, Chieri, Moncalieri e Nichelino.

²⁷ Gli ospedali spoke sono strutture sanitarie che fanno parte del modello organizzativo "hub & spoke", utilizzato dalle regioni italiane per la rete ospedaliera. Svolgono funzioni di assistenza ospedaliera di base e media complessità e indirizzano i casi più complessi verso gli ospedali hub, dotati delle specialità di alta intensità di cura.

²⁸ Il Dipartimento di Emergenza e Accettazione (DEA) di I livello è un'articolazione ospedaliera dotata di pronto soccorso avanzato e delle principali funzioni di emergenza-urgenza (medicina interna, chirurgia generale, ortopedia, anestesia-rianimazione, diagnostica h24).

Il nuovo ospedale unico Asl To5 sorgerà a Cambiano (TO), in posizione baricentrica rispetto al bacino d'utenza che servirà. In particolare, l'area di interesse è collocata nel Comune di Cambiano (TO): è ubicata nella parte sud del centro abitato e confina a sud con il tracciato della tangenziale di Torino tra la barriera di Trofarello e l'uscita di Santena, a est dall'area industriale lungo strada dei Prati, a nord dall'area industriale e dal tracciato della linea ferroviaria Torino-Asti e ad ovest dalla variante della SP29. Il territorio in questione risulta essere poco antropizzato, prevalentemente pianeggiante con una leggera pendenza da nord a sud, con una superficie complessiva di circa 420.000 m². Un'altra superficie significativa è invece occupata dal Parco Veicoli Inefficienti (circa 110.000 m²), un complesso fatiscente e ormai in disuso da anni, che insiste su un'area demaniale. Infine, il settore nord-ovest dell'area prescelta, per una superficie di 60.000 m², ha ad oggi destinazione d'uso produttiva, sebbene non siano presenti né edifici né attività.

I servizi di progettazione dell'ospedale sono stati affidati allo studio Tecnicaer Engineering S.r.l., una società italiana di architettura e ingegneria integrata, tra i principali attori nazionali attivi nella realizzazione di grandi opere pubbliche. L'azienda opera in molteplici ambiti: pianificazione urbana e mobilità, progettazione architettonica, tecnologica, impiantistica e strutturale, energy management, infrastrutture, edifici pubblici e privati. Particolarmente rilevante è il suo impegno nel settore sanitario. Infatti,

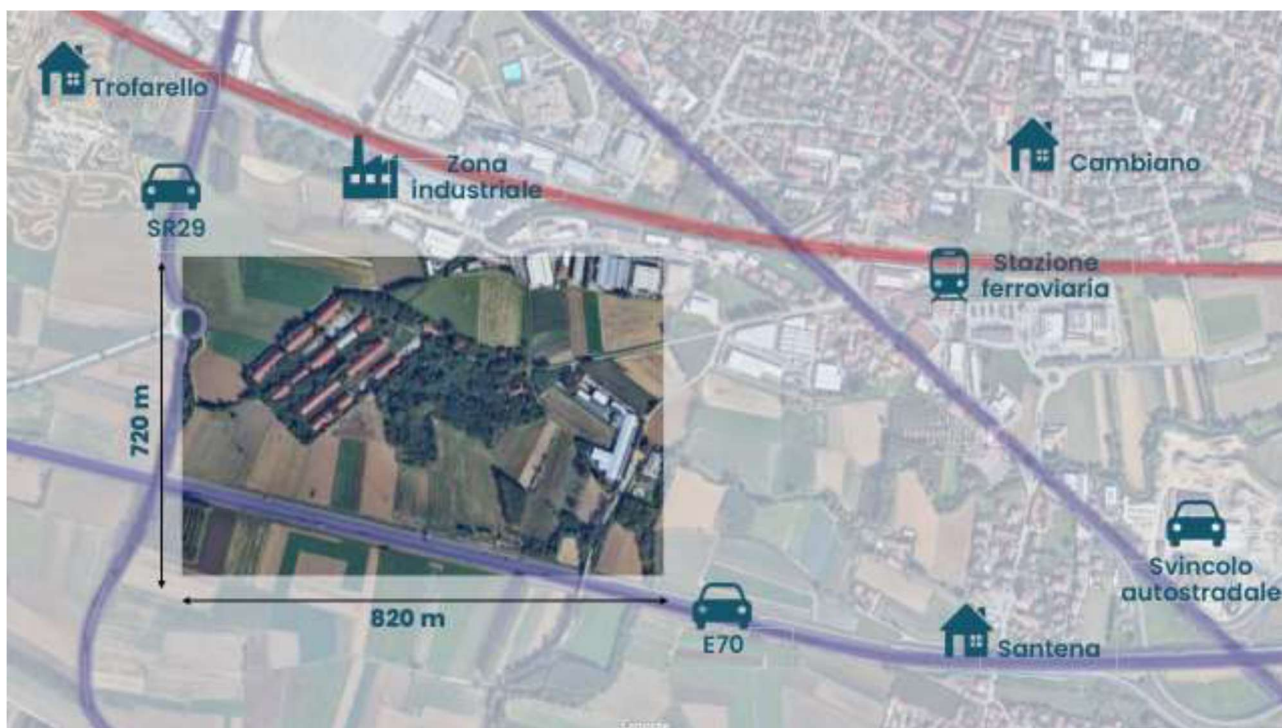


Figura 17 – Aerofotogrammetrico – analisi area vasta (Tecnicaer Engineering S.r.l.)

nel suo portfolio l'azienda include numerosi interventi dedicati alla progettazione di strutture ospedaliere, tra cui quella di Cambiano.

Il Nuovo Ospedale dell'ASL TO5 sostituirà l'attività degli attuali ospedali del distretto sanitario, ossia Ospedale Santa Croce di Moncalieri (TO), Ospedale Maggiore di Chieri (TO) e Ospedale San Lorenzo di Carmagnola (TO), servendo una popolazione di circa 310.000 abitanti. Sarà un ospedale generalista con un pronto soccorso con DEA di I livello, capace di accogliere circa 100.000 passaggi all'anno, con 470 posti letto totali, di cui 423 acuzie²⁹ e 47 tecnici³⁰, oltre ai 36 posti letto per le lungodegenze, delocalizzati a Carmagnola, sviluppato su circa 80.300 metri quadrati. Il modello di ospedale proposto è frutto di analisi multicriteri sviluppate con tecniche di ottimizzazione del progetto riferite al design rigenerativo permettendo il controllo e perfezionamento della performance dei modelli clinici gestionali e del programma funzionale e relativi legami. Particolare attenzione è stata posta alle tematiche ambientali e di natura architettonica, imponendo un dialogo tra verde, montagne e costruito e adattando le scelte tecnologiche per gestire al meglio il carattere dell'area e, di conseguenza, i relativi vincoli. Si ha, inoltre, uno sguardo al futuro nella gestione dell'intero lotto. Un futuro in cui questa struttura ospedaliera, ai confini della metropoli e immersa nel verde, diventa punto di slancio per lo sviluppo di una rete di servizi per gli abitanti dell'area, quali parchi, aree attrezzate, centri sportivi, ospitalità e ristorazione.

2.1.1. Inquadramento generale

Ubicazione e quadro dei vincoli

L'intervento è ubicato nel Comune di Cambiano, nella Città Metropolitana di Torino, a circa 21 km a sud-est del capoluogo. Si trova ai piedi delle colline torinesi, in una posizione che offre un facile accesso sia alla città di Torino sia alle zone collinari circostanti. La posizione dell'intervento risulta baricentrica rispetto al bacino di utenza servito dall'Asl TO5.

²⁹ I posti letto per acuzie sono destinati al trattamento di patologie acute, cioè condizioni a insorgenza rapida che richiedono interventi tempestivi e ricoveri di breve o media durata.

³⁰ Nella pianificazione ospedaliera italiana, i posti letto tecnici sono posti non destinati al ricovero ordinario dei pazienti, bensì a funzioni cliniche di supporto o a degenze molto brevi.

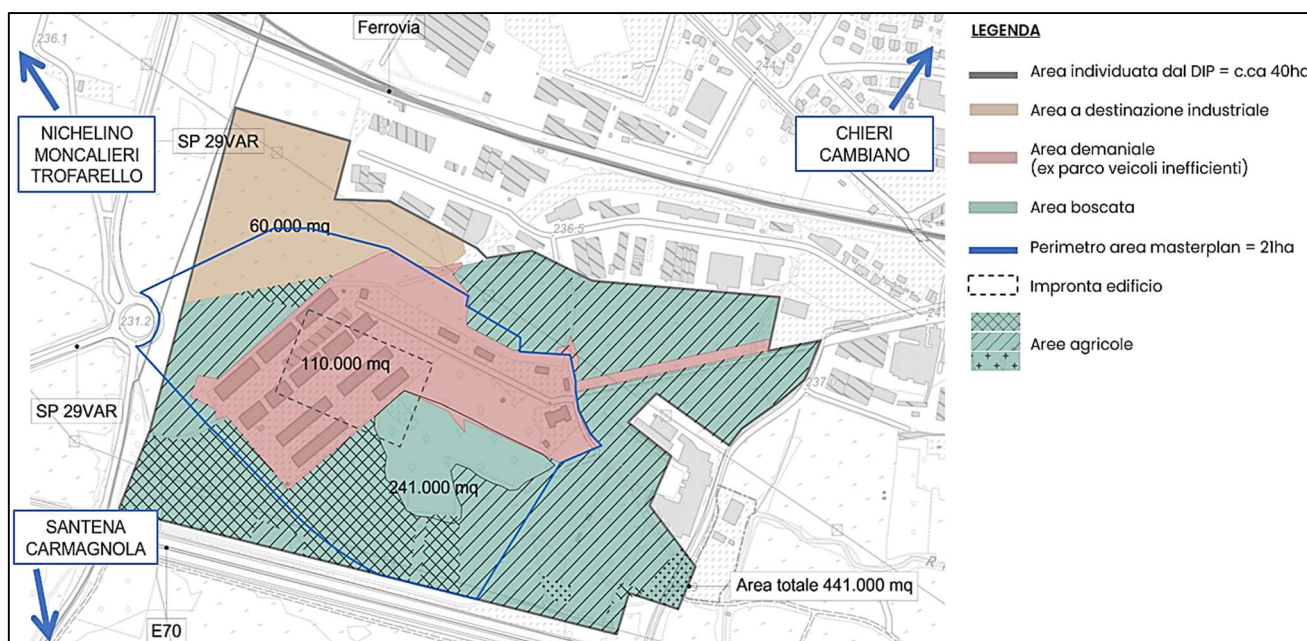


Figura 18 – Suddivisione delle aree presenti nel lotto di interesse

All'interno del territorio messo a disposizione per l'ospedale, per definire il perimetro di progetto si è agito in modo conservativo rispetto all'occupazione del territorio, al fine di minimizzare al massimo le antropizzazioni del suolo e, in generale, il consumo di suolo non necessario. Ciò ha portato alla delimitazione di un'area di 220.000 m², una contrazione pari circa al 50% rispetto all'area iniziale a disposizione, risultando in un risparmio in termini di sostenibilità ambientale ed economica.

Per quanto riguarda l'inquadramento a livello territoriale, il Comune di Cambiano rientra all'interno del Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale (PTC2)³¹. In particolare, nell'ambito sovracomunale (Ambiti di Approfondimento Sovracomunale³², art. 9 NdA), si trova nell'ambito 2 Chierese³³.

Il PTC2 assume gli AAS come il riferimento territoriale più adeguato a concertare e cogliere le opportunità di collocazione delle attività produttive, l'insediamento di "centralità" di carattere sovracomunale, la collocazione e realizzazione di servizi "sovracomunali" migliorando la loro accessibilità a residenti e possibili fruitori, la

³¹ Il PTC2 è lo strumento di pianificazione territoriale di livello provinciale della Città Metropolitana di Torino. Definisce indirizzi, prescrizioni e strategie per l'organizzazione dello sviluppo territoriale.

³² Gli Ambiti di Approfondimento Sovracomunale (AAS) sono porzioni di territorio individuate dal PTC2 in cui è necessario sviluppare analisi e strategie coordinate tra più comuni per la gestione delle funzioni sovralocali, delle infrastrutture, della mobilità e dei servizi di interesse collettivo.

³³ L'Ambito 2 Chierese raggruppa i comuni dell'area sud-orientale della Città.

A livello comunale lo strumento urbanistico che disciplina l'assetto del territorio è il Piano Regolatore Generale Comunale (PRGC), del quale seguono gli estratti che definiscono l'area in questione.



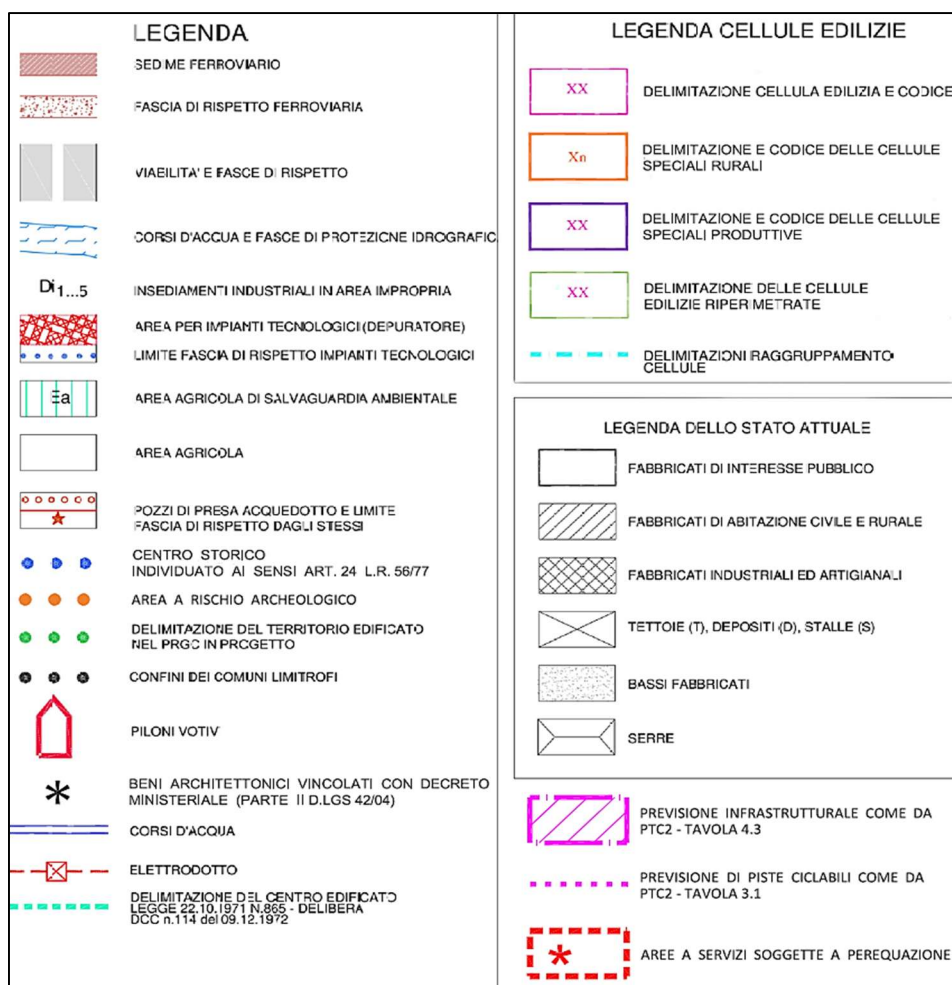


Figura 20 – Legenda tavola 4b (Variante strutturale n.2 al PRGC)

L'area di intervento ricade nelle seguenti zone:

- Area Agricola propriamente detta come disciplinato dall'Art. 31 delle Norme Tecniche di Attuazione (NTA);
- Area con edifici di interesse pubblico, non vincolati (cfr. Decreto Ministeriale N. 8574/08 del 16 giugno 2008 del Ministero per i Beni e Attività Culturali – Allegato 1),
- Zona D03n – Aree per attività produttive, come disciplinato dall'Art. 27 delle Norme Tecniche di Attuazione (NTA).

Sull'area insiste anche la programmazione per il completamento dei lotti di viabilità intercomunale della SP29VAR, con la definizione delle relative fasce di rispetto. Tale arteria rappresenta un vincolo urbanistico concreto per lo sviluppo del progetto del nuovo ospedale. L'area a disposizione subirà una modifica degli strumenti di pianificazione mediante una Variante al Piano Regolatore in carico al Comune di Cambiano, al fine di allineare la normativa urbanistica vigente alla realizzazione della nuova opera strategica.

L'analisi dei vincoli dell'area circostante il nuovo ospedale ha evidenziato una serie di condizioni paesaggistiche, geomorfologiche, idrologiche, acustiche e urbanistiche che influenzano direttamente la configurazione del progetto.

In merito al profilo paesaggistico, il PPR (Piano Paesaggistico Regionale³⁴) individua nell'area oggetto di analisi una formazione boschiva spontanea assoggettata al vincolo ex art. 142, c. 1, lett. g del D.lgs 42/2004, relativo ai territori coperti da boschi e foreste. Questa condizione impone l'obbligo di autorizzazione ai sensi della L.R. 4/2009 "Legge Forestale del Piemonte" per qualsiasi tipo di trasformazione dell'area boscata. Inoltre, il contesto è classificato nelle tavole P2 e P3 del PPR come ambito rurale/insediato non rilevante. Con questa espressione si fa riferimento a una zona prevalentemente rurale, caratterizzata da prati o aree agricole, con probabile presenza di insediamenti o infrastrutture sparse, ma che non presenta un contesto storico o ambientale di pregio. Un territorio di questo tipo risulta trasformabile, ossia non presenta valori paesaggistici sensibili o rilevanti tali da impedire la realizzazione di nuove opere.

Per quanto riguarda i vincoli geomorfologici e idrologici, la cartografia regionale mostra l'assenza di fenomeni di instabilità o di pericolosità idraulica rilevante. Il sito non è interessato da aree di esondazione e viene classificato come area soggetta a ruscellamento superficiale, senza presenza di falda prossima al piano campagna.

Dal punto di vista urbanistico, la Variante Strutturale n. 2 al PRGC definisce delle fasce di rispetto in merito alla viabilità che costituiscono dei vincoli concreti per la localizzazione del nuovo edificio:

- fascia di rispetto della Tangenziale Sud: la documentazione riporta che eventuali nuove viabilità potranno essere poste ad una distanza dall'esistente non inferiore a 20 metri, mentre per gli edifici deve essere almeno pari a 60 metri;
- fascia di rispetto della SP29 VAR: è necessario considerare una distanza minima di 30 metri tra la strada e il nuovo edificio.

La presenza di queste opere impone il rispetto delle distanze prescritte nella progettazione e modellazione delle nuove strutture, in modo da garantire le condizioni di sicurezza e compatibilità funzionale.

³⁴ Il Piano Paesaggistico Regionale (PPR) è uno strumento di pianificazione territoriale a livello regionale in Italia, finalizzato alla tutela, valorizzazione e recupero del paesaggio, disciplinando le trasformazioni del territorio in modo sostenibile, in linea con il Codice dei Beni Culturali e del Paesaggio (D.Lgs. 42/2004).

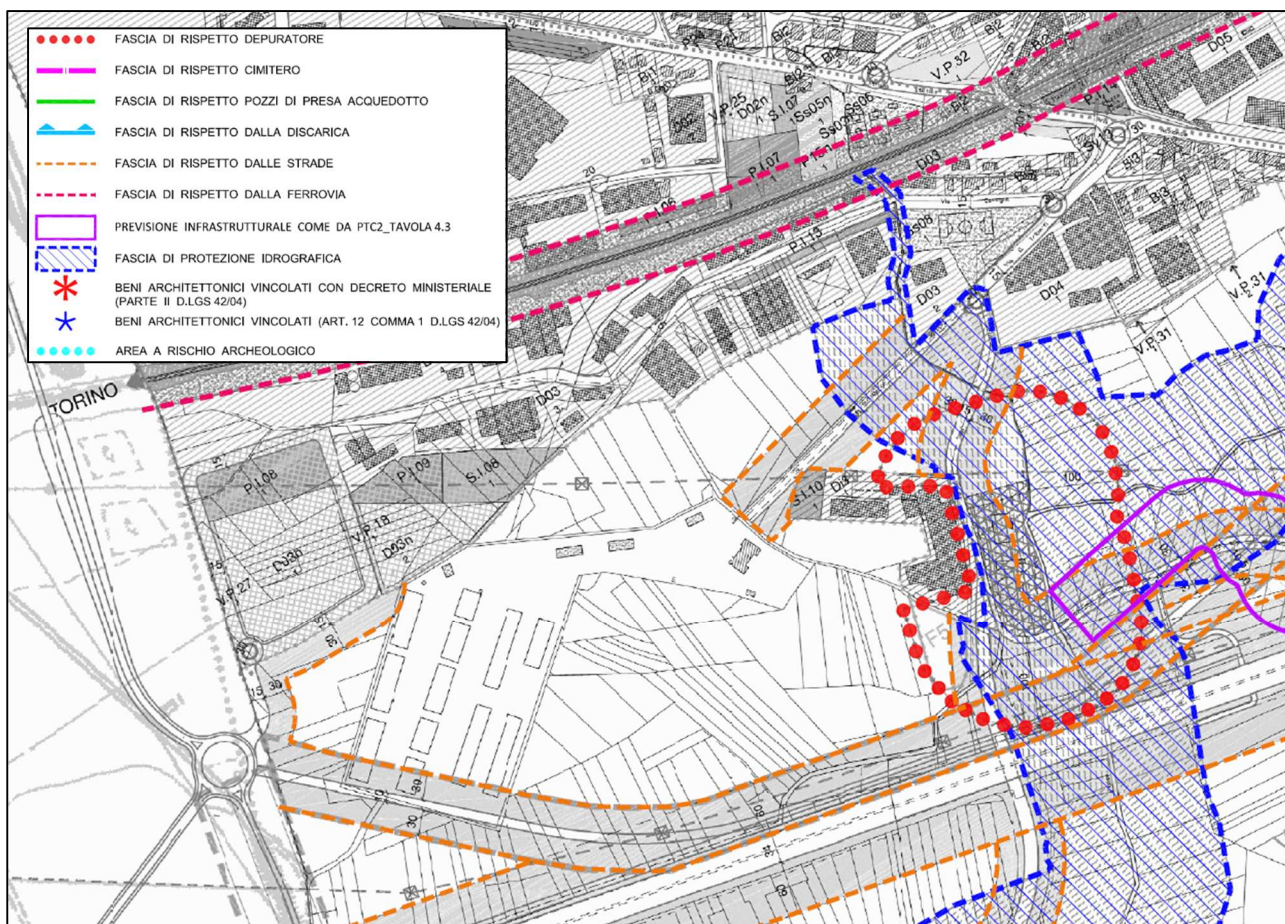


Figura 21 – Stralcio della carta dei vincoli (Tavola 10 – Variante Strutturale n. 2 al PRGC)

In base a quanto emerge dal “Piano di Classificazione Acustica del Comune di Cambiano”, l’area scelta per l’insediamento del nuovo polo ospedaliero è associata fondamentalmente a due classi acustiche:

- Classe III per tutto il territorio a destinazione d’uso agricolo,
- Classe IV per l’area demaniale occupata dall’ex Parco Veicoli Inefficienti e per l’area produttiva nel quadrante nord-ovest a ridosso della variante alla SP29.

Il quadro acustico vigente non presenta criticità nel territorio in esame, pur richiedendo l’aggiornamento del piano a seguito della realizzazione dell’opera.

Infine, con riferimento ai beni culturali, il Decreto Ministeriale 8574/08 dichiara il “non interesse culturale” dell’area e, in particolare, dell’ex deposito militare situato nella zona in esame. Tale provvedimento è stato confermato più recentemente in un’interlocuzione informale con l’amministrazione competente, consentendo la totale demolizione degli edifici esistenti prevista dal progetto dell’ospedale.

Complessivamente, il contesto circostante l'area di intervento risulta essere idoneo all'insediamento del nuovo polo ospedaliero. Tuttavia, è necessario che la progettazione recepisca con attenzione le prescrizioni normative e di pianificazione vigenti e affronti con particolare precisione la gestione delle componenti boschive, delle fasce di rispetto e degli aspetti acustici, che rappresentano gli elementi vincolanti più significativi della zona.

Criteri per la progettazione architettonica

Per la realizzazione costruttiva dell'intero intervento si è fatto ricorso a tecnologie e materiali che, oltre a garantire la rispondenza delle prestazioni richieste dalla struttura in questione, potessero offrire prestazioni supplementari sotto il profilo delle implicazioni manutentive, di durabilità e di economia gestionale, garantendo al tempo stesso una continuità linguistica con le morfologie e gli elementi propri del contesto d'intervento. I materiali sono stati scelti in base alla bassa energia inglobata, alla certificazione di bassa tossicità, nonché alla valutazione della qualità e della provenienza. Un analogo criterio è stato adottato nella scelta dei componenti e delle finiture, mediante l'impiego di prodotti certificati a basso impatto ambientale ed economicamente vantaggiosi. Sono state inoltre valutate le metodologie di posa e di assemblaggio, privilegiando prodotti facilmente riciclabili o disassemblabili. L'utilizzo di una tecnologia a secco, già ampiamente sperimentata in realizzazioni simili, consente la completa trasformabilità degli ambienti, senza interventi di demolizione, e la possibilità di modifiche e manutenzione limitate nel tempo: a tale fine sono stati previsti divisori realizzati con pareti in cartongesso o in altri materiali compositi evoluti su orditura metallica.

Il progetto si configura secondo un impianto distributivo lineare a sviluppo longitudinale, impostato sul modello "Piastra-Torre", una scelta che consente di ottimizzare l'organizzazione dei percorsi esterni e garantire la separazione tra i diversi flussi logistici, principio essenziale nell'architettura ospedaliera contemporanea. Questa configurazione prevede una base orizzontale che ospita le funzioni ad alta intensità, come le sale operatorie e la diagnostica, e delle torri sovrastanti dedicate alle degenze. Una distribuzione organizzata in questo modo consente di separare i flussi, ottimizzare i percorsi e garantire l'efficienza funzionale dell'intera struttura ospedaliera.

La conformazione planimetrica è caratterizzata da un asse principale lungo il quale si innestano volumi secondari ortogonali, creando una composizione chiara e immediatamente leggibile anche dall'esterno, capace di dialogare armoniosamente sia

con il tessuto urbano sia con il paesaggio agricolo circostante. Dal punto di vista compositivo, l'alternanza modulare di pieni e vuoti e le partizioni volumetriche introducono una scansione ritmica delle facciate, permettendo un controllo accurato delle proporzioni.

La scelta di un basamento in laterizio definisce una base solida e orizzontale che ancora visivamente l'edificio nel contesto locale, mentre i volumi superiori, leggeri e contemporanei con superfici vetrate e pannelli metallici, introducono un linguaggio architettonico attuale e dinamico. La chiarezza geometrica perseguita nella composizione risponde alle esigenze di modularità e ripetibilità tipiche di un'architettura ospedaliera efficiente, in cui le maglie strutturali regolari e le campate calibrate assicurano la massima flessibilità agli spazi interni. L'ingresso principale, enfatizzato da un'ampia vetrata a tutta altezza, costituisce l'elemento che gerarchizza gli accessi e caratterizza il prospetto con un segno architettonico distintivo, conferendo all'edificio un'identità immediatamente riconoscibile.

L'involucro esterno, definito dall'alternanza tra pannelli opachi e superfici vetrate dotate di schermature solari, oltre a regolare l'ingresso di luce naturale, contribuisce a generare un'immagine dinamica e articolata del prospetto, con giochi luminosi che variano nel corso della giornata. Al piano terra si trova uno spazio di accesso protetto che rafforza la connessione tra l'interno e i percorsi esterni, favorendo la percezione di un ambiente aperto e inclusivo. Al calare del sole, l'illuminazione architettonica serale valorizza la trasparenza del volume d'ingresso, trasformando l'edificio in un landmark notturno che trasmette un'idea di apertura e di modernità rassicurante, qualità imprescindibili per un polo ospedaliero contemporaneo. Il fronte dell'entrata è incorniciato dalla quinta in mattone, che si prolunga fino al volume dell'edificio, enfatizzando il ruolo dell'ingresso come nodo principale di accesso.

Attraversando la quinta in laterizio si accede alla Main Street, uno spazio che accoglie l'utente e il visitatore permettendo una comprensione intuitiva degli spazi e offrendo uno sguardo sul parco e sul contesto naturale circostante. La texture del paramento in laterizio traforato si contrappone alle superfici vetrate, generando un gioco di pieni e vuoti che definisce un ritmo visivo e una suggestiva interazione tra luce e ombra, mutevole nel corso della giornata. Questa composizione rende l'ingresso un elemento iconico, riconoscibile e capace di conferire al polo ospedaliero un'identità forte e contemporanea. All'interno, la Main Street si configura come asse longitudinale e vera ossatura distributiva dell'edificio, caratterizzata dalla ripetizione modulare di elementi

strutturali di copertura a vista che scandiscono lo spazio, donando un ritmo regolare e una percezione di grande profondità prospettica. La sequenza di setti e pilastri, alternati a partizioni verticali continue, definisce una gerarchia spaziale chiara e leggibile, mentre l'alternanza tra pieni e vuoti produce una scansione dinamica del percorso. Internamente, la copertura dotata di lucernari lineari assicura un'illuminazione naturale diffusa e un senso di spazialità ariosa, fondamentali per garantire un ambiente confortevole e facilmente orientabile per l'utenza. In questo modo, l'asse centrale assume un duplice ruolo, fungendo non solo da spazio distributivo, ma anche da elemento di orientamento interno e landmark architettonico, grazie alla sua riconoscibilità e alla chiarezza compositiva. Le superfici vetrate a tutta altezza lungo il fronte longitudinale assicurano continuità visiva con l'esterno, accentuando la permeabilità luminosa e la relazione con il paesaggio. La linearità della copertura e la ripetizione rigorosa degli elementi strutturali conferiscono all'insieme un'immagine ordinata e funzionale, perfettamente coerente con le esigenze di un ospedale moderno, in cui la chiarezza distributiva e la qualità percettiva degli spazi costituiscono requisiti imprescindibili. Il basamento del polo ospedaliero è caratterizzato da un treillage in laterizio³⁵, elemento architettonico distintivo. La trama regolare dei mattoni crea un linguaggio omogeneo e contemporaneo, introducendo un ritmo visivo capace di conferire ordine e identità al complesso, trasformando il volume dell'ospedale in un punto di riferimento facilmente riconoscibile.

Il laterizio, materiale tradizionale del territorio, si rinnova in questa maglia innovativa che alterna pieni e vuoti, instaurando un dialogo con il contesto locale e contemporaneamente adottando una forma attuale. Oltre al valore estetico, il treillage funge da sistema frangisole passivo, riducendo l'irraggiamento diretto sulle facciate retrostanti e contribuendo a mitigare i carichi termici estivi, con un impatto positivo sui consumi energetici. Gli interstizi della maglia favoriscono la ventilazione naturale, migliorando il microclima interno e riducendo il rischio di surriscaldamento, mentre la luce filtrata crea ambienti morbidi e accoglienti, riducendo l'abbagliamento e contribuendo al benessere psicologico di pazienti e operatori. Infine, l'illuminazione notturna retrostante trasforma la facciata in un segno scenografico che rende l'ospedale un punto di riferimento anche nelle ore serali, restituendo un'immagine rassicurante e di alta qualità, coerente con l'idea di un luogo di cura contemporaneo.

³⁵ Il treillage in laterizio si riferisce a una tecnica costruttiva che utilizza mattoni (laterizi) disposti a griglia o reticolo, creando strutture decorative e funzionali



Figura 22 – Render del nuovo ospedale inserito nel contesto (Tecnicaer Engineering S.r.l.)



Figura 23 – Vista frontale dell'ingresso principale (Tecnicaer Engineering S.r.l.)

L'organizzazione degli spazi e del layout funzionale, oltre ai benefici di natura organizzativa e sanitaria, si traduce in un'articolazione razionale dei percorsi che consente un facile e intuitivo orientamento degli utenti e in un programma coerente di rinnovamento e manutenzione dell'organismo edilizio, mediante un rinnovo tecnologico degli impianti veloce e meno invasivo per l'attività ospedaliera. L'edificio è composto da 7 livelli con lo scopo di identificare un'organizzazione per macro-blocchi funzionali.

Le aree funzionali si articolano nei piani secondo uno schema ben definito:

- il **piano seminterrato** è destinato alla logistica, alla farmacia, alla mensa e ai parcheggi;
- la **piastra High Care** si sviluppa su due livelli (piano terra e piano primo), con il piano terra destinato all'emergenza-urgenza, oltre ad alcune attività diurne come dialisi e radiologia, e il piano primo per aree interventistiche e intensive, oltre che per i laboratori;
- una **Main Street** che distribuisce i flussi pubblici principali e garantisce la razionalizzazione e la separazione dei percorsi (visitatori, pazienti, personale, ...);
- un **piano tecnologico**, il secondo, sovrasta completamente la piastra ospitando anche alcune funzioni sanitarie diurne (ambulatori, oncematologia);
- i corpi longitudinali per le **degenze** (ordinarie e subintensive) si elevano in tre livelli (piani terzo, quarto e quinto).

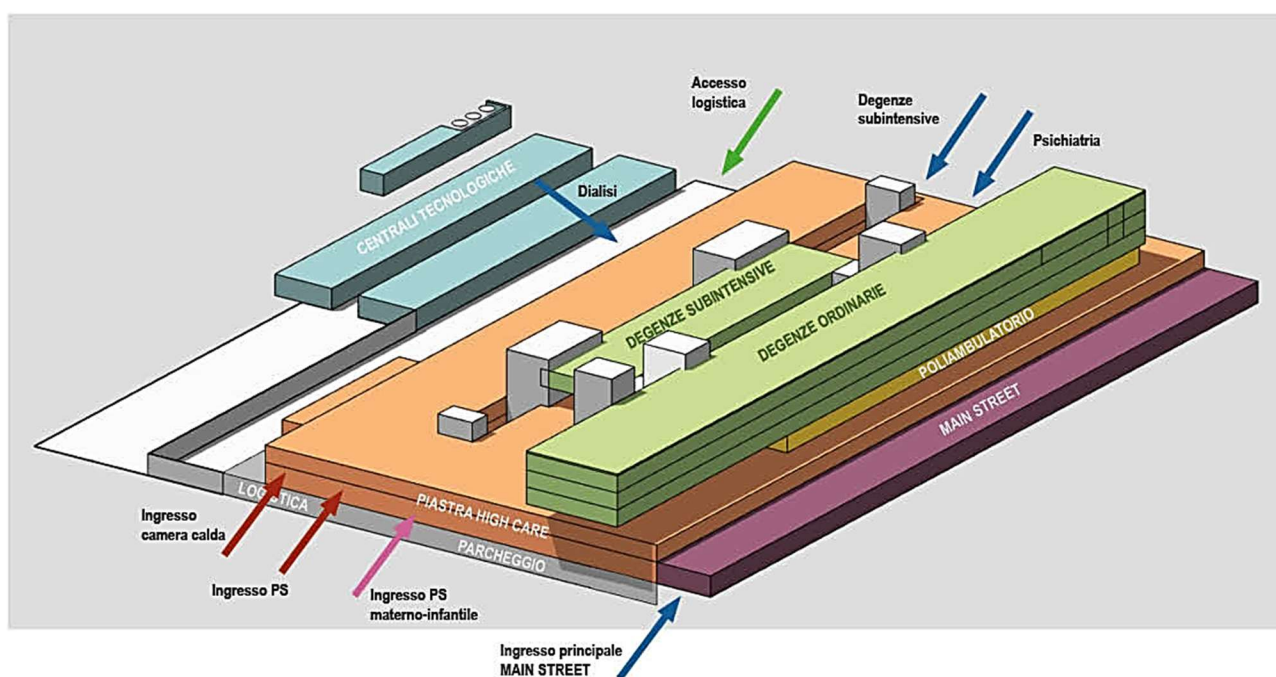


Figura 24 – Schema organizzativo e funzionale del nuovo ospedale (Tecnicaer Engineering S.r.l.)

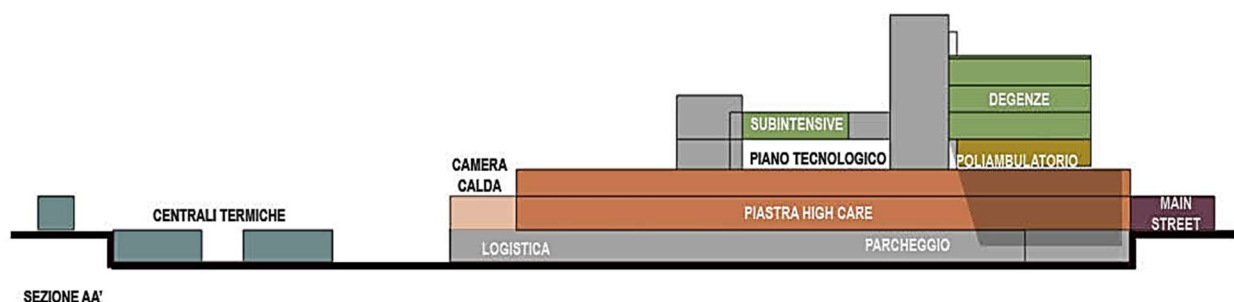


Figura 25 – Sezione tipologica del nuovo ospedale (Tecnicaer Engineering S.r.l.)

2.1.2. Descrizione dell'intervento

Come precedentemente descritto, l'area di intervento è costituita in gran parte da terreni agricoli, per una parte minore da terreni antropizzati, su cui ad oggi sorge l'area dell'ex autoparco di veicoli militari, e infine da un bosco spontaneo di rilevanza naturalistica nulla. Gli edifici presenti verranno interamente demoliti con lo scopo di lasciare spazio alla nuova costruzione. Nonostante i limiti relativamente ristretti dell'area, l'inserimento dell'opera ha seguito criteri di conservazione e di sostenibilità ambientale, economica e sociale. Il progetto architettonico è stato sviluppato con l'obiettivo di integrare armoniosamente il nuovo ospedale nel contesto territoriale, riducendone l'impatto visivo e funzionale.

La localizzazione dell'edificio è stata studiata per massimizzare la conservazione del paesaggio naturale, evitando un'eccessiva artificializzazione della zona e favorendo una transizione graduale tra l'ambiente costruito e quello naturale. L'area di intervento si trova in un territorio caratterizzato da una prevalente vocazione agricola e da terreni non più coltivati e in parte riconquistati dalla vegetazione spontanea. Per preservare la memoria storica, il progetto ha previsto la conservazione di alcuni tasselli della trama agricola nelle zone nord-est e nord-ovest.

Dal punto di vista funzionale, il progetto prevede una rete di percorsi che consente sia l'attraversamento completo del parco sia una connessione diretta con l'ospedale. Questa soluzione favorisce la continuità dell'esperienza paesaggistica e la fruizione degli spazi verdi da parte di pazienti, visitatori e personale sanitario.

L'area di intervento comprende una superficie boscata di 25.360 m², soggetta ad un vincolo paesaggistico imposto dal decreto legislativo 42/04 ("Codice del Paesaggio") e

dalla legge regionale 4/2009 ("Legge Forestale Regione Piemonte"). La progettazione ha dedicato particolare attenzione alla salvaguardia e alla valorizzazione di questo patrimonio naturale. L'impronta dell'edificio è stata infatti definita tenendo conto dei vincoli, con l'obiettivo di preservare la maggior parte del bosco esistente. Di questi 25.360 m², 21.660 saranno mantenuti e integrati nel parco ospedaliero, creando un corridoio verde che amplifica l'effetto rigenerativo sul territorio. La conservazione del bosco svolge inoltre un ruolo fondamentale nella mitigazione del microclima e nella gestione delle acque meteoriche: la vegetazione esistente aiuta a regolare le temperature, riducendo l'effetto isola di calore³⁶, e contribuisce all'assorbimento delle acque piovane, prevenendo fenomeni di ruscellamento e sovraccarico della rete fognaria.

La progettazione del verde del nuovo ospedale è stata concepita per migliorare il comfort ambientale, ridurre l'impatto ecologico e promuovere una gestione sostenibile delle risorse naturali. L'area si articola in due componenti principali: un parco naturalizzato e uno spazio attrezzato a terra, situato ai piedi dell'edificio. Quest'ultimo, con un disegno a fasce che riprende la trama agricola del territorio, crea un legame diretto tra il nuovo ospedale e il paesaggio circostante, mantenendo viva la memoria storica della zona. Il parco, caratterizzato da un'alta naturalizzazione, è studiato per favorire la biodiversità e integrare il bosco esistente, contribuendo in modo sostanziale alla rigenerazione dell'area. Oltre ai benefici ambientali, esso genera un impatto positivo sul territorio, fungendo da elemento di raccordo tra la natura preesistente e le nuove aree verdi e migliorando la percezione del microambiente per tutti gli utenti. L'area attrezzata, posizionata lungo il lato sud dell'edificio, è pensata per accogliere attività e momenti di sosta, creando un gradiente relazionale che valorizza la continuità paesaggistica. Inoltre, l'impiego di superfici permeabili, pergole e alberature sui parcheggi contribuisce a ridurre il surriscaldamento del suolo e ad offrire ombreggiamento. Un sistema di raccolta delle acque meteoriche (bacini e depressioni inerbite) regola il deflusso e favorisce l'infiltrazione naturale. In questo modo, il trattamento del verde si configura non solo come un intervento estetico, ma anche come un elemento chiave per la sostenibilità e il benessere dell'intero complesso.

³⁶ L'effetto isola di calore è un fenomeno per cui le aree urbanizzate registrano temperature più elevate rispetto ai contesti naturali circostanti, a causa dell'accumulo e del rilascio di calore da parte delle superfici artificiali e della riduzione delle aree vegetate.



Figura 26 – Masterplan del progetto (Tecnicaer Engineering S.r.l.)



Figura 27 – Strategia paesaggistica (Tecnicaer Engineering S.r.l.)

Accessibilità e percorsi

Le analisi viabilistiche condotte hanno approfondito l'attuale configurazione viaria dell'area interessata dal progetto del nuovo ospedale e ne hanno valutato l'impatto futuro, considerando l'aumento significativo dei flussi di traffico generati dalla nuova

struttura. Lo studio ha fatto ricorso a modelli di simulazione sia macroscopici, per stimare complessivamente i flussi veicolari sull'intera rete stradale, sia microscopici, per valutare con precisione il funzionamento delle singole intersezioni chiave nelle condizioni di maggior carico. Tra le tematiche principali affrontate vi è stata la necessità di separare efficacemente i flussi di traffico destinati a differenti utenze ospedaliere, garantendo accessi differenziati per i servizi di emergenza, quali pronto soccorso e ambulanze, posizionati a nord dell'edificio, e per i visitatori e il personale, attraverso un nuovo asse viario a sud, supportato dall'introduzione di una rotatoria in grado di gestire in modo efficiente l'afflusso e la distribuzione veicolare verso le aree di sosta dedicate. L'analisi degli assi viari circostanti e delle intersezioni strategiche ha permesso di identificare i punti critici e valutare le necessarie migliorie, porgendo particolare attenzione alla capacità delle strade e alla sicurezza di tutti gli utenti, inclusi pedoni e ciclisti. La determinazione della fascia oraria di massimo carico ha consentito di focalizzare l'attenzione sulle condizioni più impegnative per la rete, garantendo che le soluzioni progettuali siano dimensionate per rispondere anche alle situazioni di picco. Nel complesso, la progettazione viabilistica integrata nel masterplan del nuovo ospedale risponde in modo coerente e funzionale alle esigenze di accessibilità, sicurezza e fluidità del traffico.

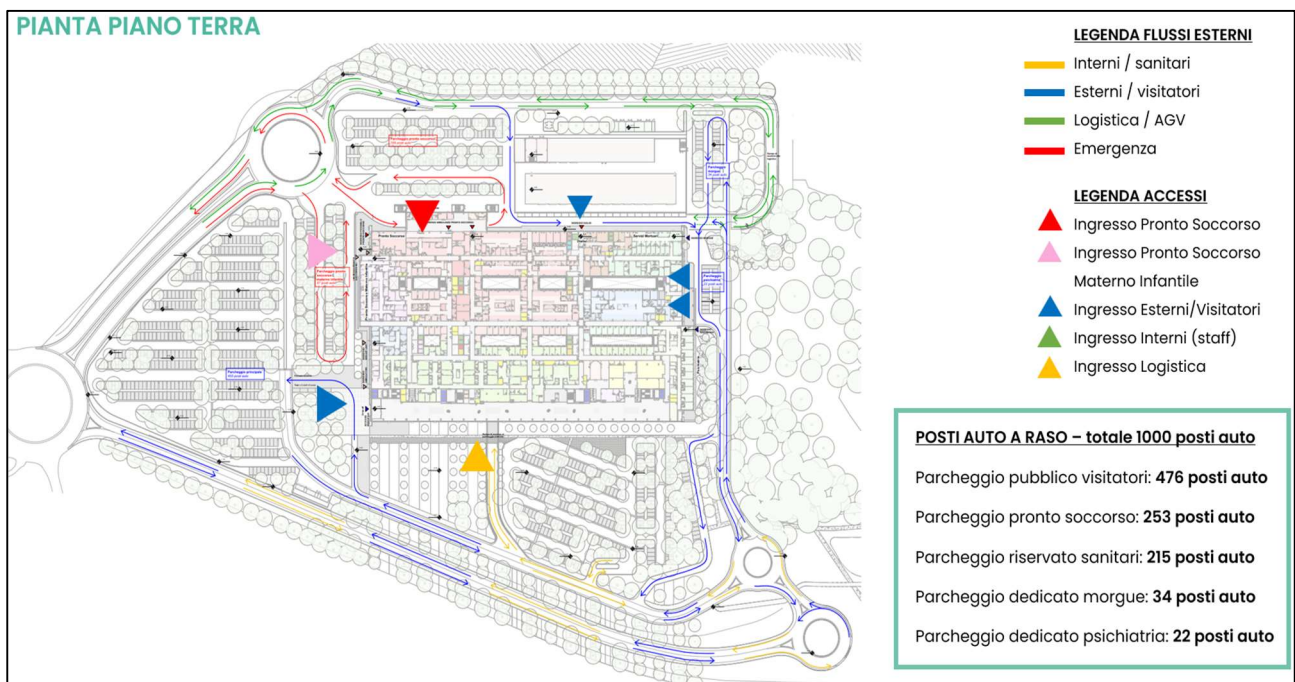


Figura 28 – Percorsi, accessi e parcheggi al piano terra (Tecnicaer Engineering S.r.l.)

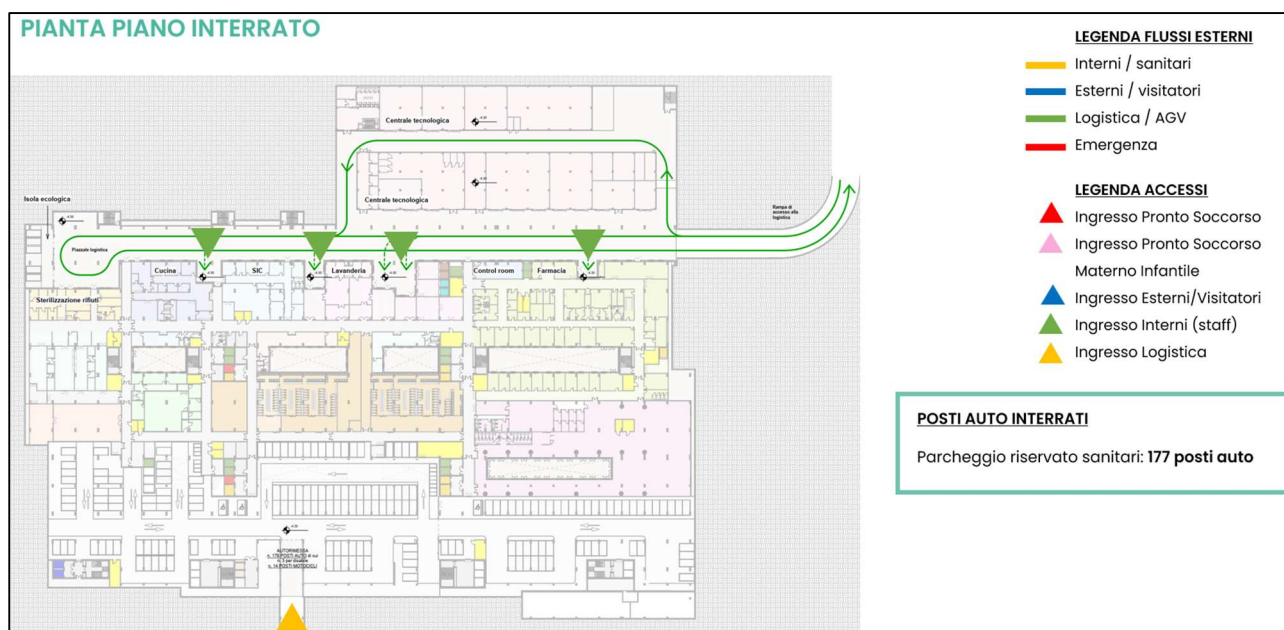


Figura 29 – Percorsi, accessi e parcheggi al piano interrato (Tecnicaer Engineering S.r.l.)

La realizzazione di una nuova viabilità e di una rotatoria dedicata contribuisce a distribuire efficacemente i flussi, prevenendo congestioni e migliorando la fruibilità complessiva del polo sanitario. Questo approccio garantisce non solo una risposta adeguata all'incremento della domanda generata dall'ospedale, ma anche un significativo miglioramento della qualità della mobilità nell'intera area circostante, rafforzando il ruolo della struttura come punto di riferimento sanitario e infrastrutturale per la comunità e il territorio.

Descrizione funzionale del manufatto

Per quanto riguarda l'involucro esterno della struttura, l'organizzazione e il disegno della pelle dell'edificio sono determinati da un impianto compositivo stratificato, in cui si alternano differenti sistemi costruttivi, sia per materiali che per tecnologie. Il progetto si sviluppa secondo i criteri della modularità, adottando un linguaggio contemporaneo che, tuttavia, stabilisce un legame chiaro con la tradizione costruttiva del luogo.

I fronti si articolano prevalentemente attraverso l'impiego di sistemi a facciata continua³⁷, alternati a moduli di facciata prefabbricati in calcestruzzo. Le soluzioni adottate per il cosiddetto "rivestimento caldo" dell'edificio sono tutte tecnicamente

³⁷ La facciata continua è un tipo di involucro esterno non portante di un edificio, realizzato con materiali leggeri come vetro, alluminio o pannelli, che protegge dagli agenti atmosferici, migliora l'isolamento e conferisce un design moderno.

consolidate, ampiamente sperimentate e realizzate secondo logiche modulari, che permettono un alto grado di prefabbricazione e una gestione prevalentemente a secco del sistema costruttivo.

Ai piani terreno e primo, in corrispondenza dei fronti est ed ovest della grande piastra che ospita le funzioni dell'high care e dell'ospedale di giorno, il progetto prevede una seconda pelle "fredda", costituita da una quinta traforata ottenuta attraverso una maglia in laterizio disposta a graticcio. Questo elemento si estende per un'altezza di circa 10 metri, rivestendo ampie porzioni dei fronti e conferendo al basamento una connotazione materica su scala paesaggistica. Le quinte in cotto sono sorrette da una struttura in acciaio, progettata per garantire la massima leggerezza e autonomia statica del sistema.

Il sistema costruttivo adottato, ovvero un mandolato a vuoti e pieni, consente la massima permeabilità visiva, pur mantenendo integrità e coerenza materica. I mattoni, di dimensione standard, con finitura "a vivo", apparecchiati a malta, saranno pienamente leggibili e riconoscibili nel loro assetto costruttivo. Il rimando alla tradizione produttiva e costruttiva dei luoghi non è dunque soltanto ideale ed accennato, leggibile insomma solo nelle intenzioni di un'architettura fine a sé stessa, ma è concretamente restituito alla percezione del visitatore comune.

Il linguaggio contemporaneo dell'intervento non si esprime dunque nella materia utilizzata, intenzionalmente tradizionale, bensì nella scala compositiva, nella trasparenza e nella leggerezza dei pannelli, che sembrano fluttuare senza vincoli visibili. Le quinte si staccano visivamente dai volumi retrostanti, definendo un rapporto di equilibrio tra solidità e sospensione, rinnovando in chiave attuale elementi radicati nel territorio e nella memoria collettiva.

Oltre alla valenza estetica e simbolica, le grandi quinte modulari generano uno spazio tecnico interstiziale che consente l'alloggiamento a vista – ma schermato – di componenti impiantistici come canalizzazioni, griglie di aerazione, pluviali e altri elementi funzionali. In questo modo, si evitano impatti estetici negativi, con vantaggi evidenti in termini di costi e gestione. I moduli prefabbricati in calcestruzzo, quando collocati dietro al treillage in cotto, possono quindi adottare finiture semplici ed economiche, senza necessità di trattamenti estetici aggiuntivi, portando i costi in linea con quelli dell'edilizia industriale.

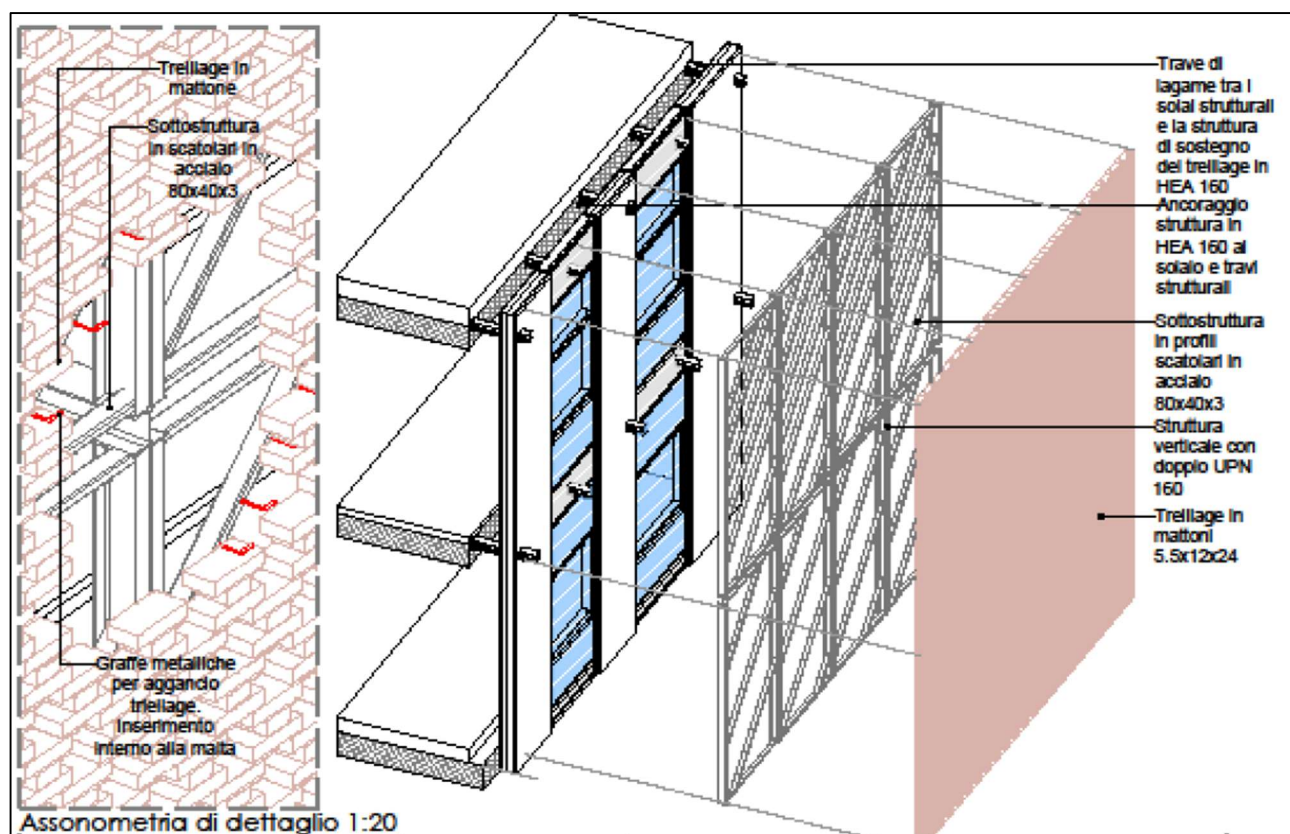


Figura 30 – Quinte in trellage (Tecnicaer Engineering S.r.l.)

Il corridoio tecnico generato tra la facciata retrostante e la pelle traforata ha anche una funzione operativa: dimensionato per garantire l'accessibilità, consente la pulizia delle vetrate non apribili, un'eventuale connessione tecnica con i piani interrati, oltre a contribuire all'areazione degli stessi. Le dimensioni del corridoio permettono inoltre l'eventuale rimozione e sostituzione di porzioni di facciata modulare. Le facciate interne a questo spazio sono rivestite con pannelli prefabbricati in calcestruzzo, alternati a moduli di facciata continua.

La maglia formale dei grandi fronti nord e sud del Blocco Degenze, che a prima vista appare estremamente complessa ed articolata, in realtà è risolta da un modulo di facciata continua tradizionale, a montanti e traversi, assolutamente regolare e semplice. Su questo modulo uniforme il disegno architettonico si sviluppa però evitando qualsiasi effetto di ripetizione: le porzioni opache e trasparenti variano in dimensione e disposizione, i pannelli metallici e vetrati alternano cromie e finiture sottili, elementi in aggetto sia verticale che orizzontale producono un sofisticato gioco di pieni e vuoti, luci e ombre. Il risultato è una facciata vibrante, che muta con la luce naturale e con l'angolo visuale, in costante dialogo con l'ambiente e con il cielo, mai identica a sé stessa.

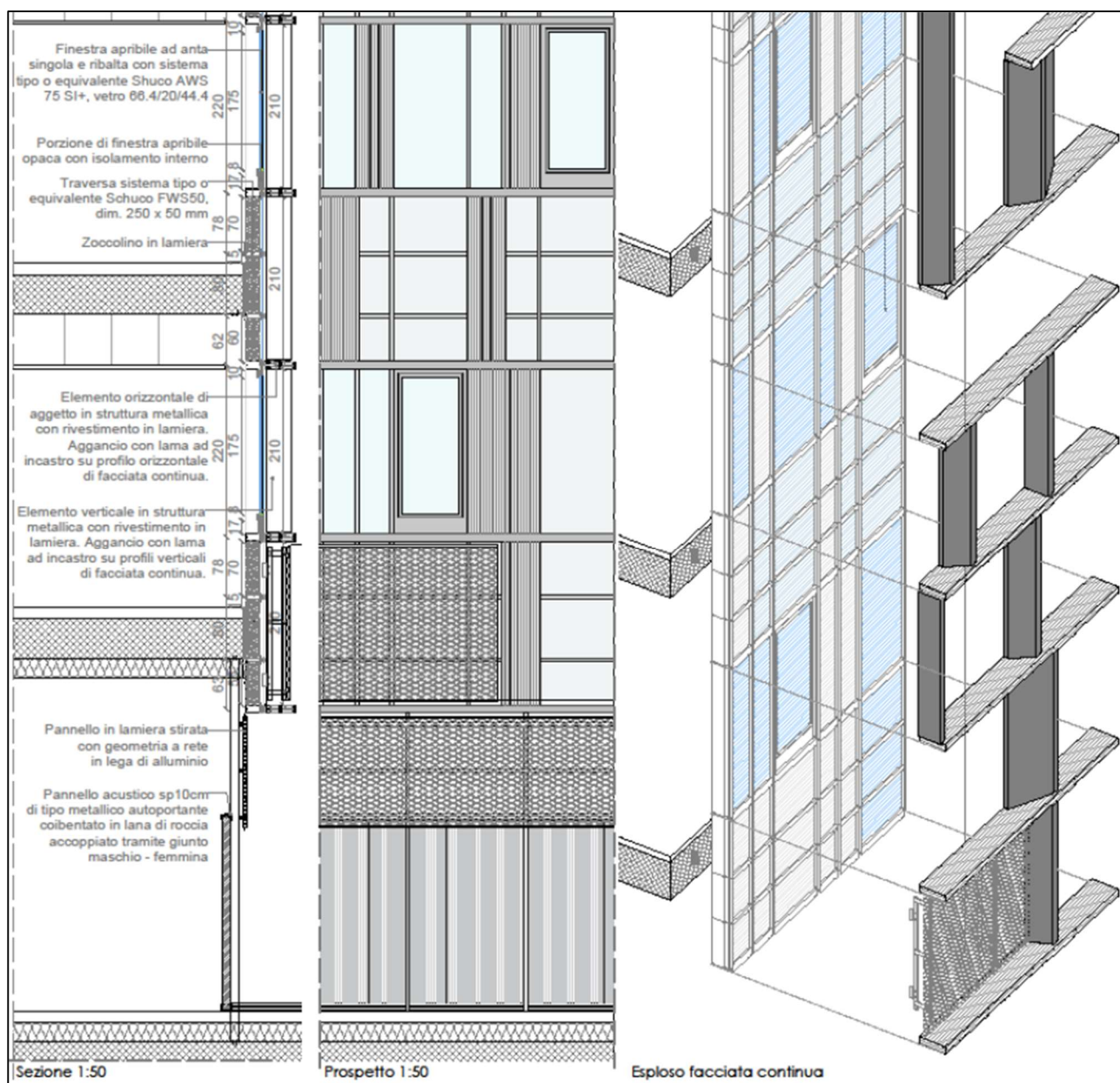


Figura 31 – Dettaglio della facciata continua (Tecnicaer Engineering S.r.l.)

Il volume della camera calda del Pronto Soccorso è, invece, interamente rivestito in lamiera stirata. Tale scelta, oltre a garantire riconoscibilità immediata, permette di distinguere con chiarezza questa funzione specialistica dal resto del basamento sul lato nord. La lamiera stirata ricorre più volte nell'articolazione complessiva della facciata, divenendo un motivo tecnologico unificante. Essa si riconfigura di volta in volta in fasce orizzontali e verticali sui fronti delle degenze, nei rivestimenti delle torri distributive, all'interno dei patii in facciata continua, come marcapiano e come tamponamento laterale delle quinte in laterizio.

Complessivamente, il contrasto tra la solidità compatta del basamento, il rigore formale dei blocchi funzionali e la leggerezza articolata del grande corpo delle degenze non è solo una scelta estetica, ma rispecchia la logica funzionale dell'organismo edilizio: un impianto distributivo reticolare e ordinato al piano terra si contrappone ad una struttura distributiva longitudinale e modulare ai piani alti. Il risultato è un equilibrio architettonico misurato e coerente, in cui semplicità costruttiva e ricchezza percettiva convivono armoniosamente.

Come anticipato, per il nuovo ospedale di Cambiano è stata scelta una configurazione architettonica e ingegneristica basata sul modello piastra-torre, soluzione ormai consolidata a livello internazionale nei grandi ospedali che erogano servizi a livello territoriale, modello che permette di garantire efficienza, chiarezza distributiva e flessibilità funzionale. La piastra, estesa in orizzontale nei livelli inferiori (interrato, piano terra, piano primo e piano secondo), accoglierà le funzioni a maggiore intensità di cura, come pronto soccorso, diagnostica per immagini, blocchi operatori e ambulatori specialistici. Questa scelta è pensata per concentrare le attività sanitarie con alti flussi di pazienti e personale in un'unica piattaforma orizzontale facilmente accessibile, riducendo i tempi di percorrenza interni e semplificando la gestione dei servizi. Le torri di degenza si svilupperanno verticalmente al di sopra di quest'ultima, ospitando le camere di degenza ordinaria e le unità a bassa intensità di cura. Questa disposizione permetterà di separare i flussi dei degenti da quelli dei pazienti ambulatoriali e dei visitatori, migliorando l'organizzazione dei percorsi, la privacy e il controllo delle infezioni. La configurazione verticale consentirà inoltre di garantire la massima esposizione alla luce naturale e un'ottima ventilazione per le stanze di degenza, incrementando il comfort e favorendo il recupero dei pazienti. Elemento centrale dell'ospedale sarà la Main Street, un asse distributivo principale che si svilupperà longitudinalmente lungo la piastra e diventerà il cuore pulsante dell'organizzazione interna e della vita pubblica della struttura sanitaria. La Main Street permetterà un collegamento diretto e intuitivo tra gli ingressi, i servizi diagnostici e terapeutici e le aree ambulatoriali, offrendo spazi ampi e luminosi, destinati anche all'accoglienza e alle attività di supporto come reception, punti di ristoro e aree di attesa. Questo sistema distributivo contribuirà a un orientamento semplice e immediato per pazienti e visitatori, riducendo lo stress e favorendo una fruizione agevole dell'ospedale.

Particolare attenzione è stata riservata agli aspetti logistici: il modello piastra-torre permette di ottimizzare i flussi orizzontali dei pazienti, del personale e dei materiali

all'interno della piastra, e quelli verticali tra la piastra stessa e le torri di degenza, grazie a nuclei di collegamento separati che assicurano percorsi dedicati per i diversi utenti e per i flussi sporco/pulito. Gli ingressi sono stati studiati in funzione dei percorsi differenziati: il pronto soccorso ha un accesso dedicato con camera calda per l'emergenza, separato dall'ingresso del pronto soccorso materno-infantile, mentre ulteriori accessi sono stati previsti per il blocco dialisi, la psichiatria e le aree di supporto logistico; al fine di renderli maggiormente identificabili e riconoscibili, sono state implementate moderne strategie di Way Finding e Design 4 all'utenti a rendere questi ingressi secondari facilmente riconoscibili da tutti. L'ingresso principale destinato al pubblico esterno è collocato in posizione baricentrica rispetto alla Main Street, in modo da garantire un'accoglienza efficace e una distribuzione diretta verso i principali servizi di diagnostica e day hospital. Questa organizzazione consente di ridurre drasticamente le interferenze tra le varie tipologie di traffico, migliorando l'efficienza operativa e la sicurezza complessiva della struttura.

A livello impiantistico, è prevista la realizzazione di un piano tecnico posto tra la piastra e i livelli di degenza, dedicato alla distribuzione delle reti meccaniche, elettriche e tecnologiche. Questo piano tecnico impiantistico, concepito come un vero e proprio livello a sé stante, garantirà la massima flessibilità nella manutenzione e nell'aggiornamento degli impianti, evitando interruzioni alle attività sanitarie sovrastanti e permettendo al contempo un'ottimale gestione dell'efficienza energetica.



Figura 32 – Vista interna della camera di degenza (Tecnicaer Engineering S.r.l.)

L'articolazione volumetrica comprenderà spazi specifici per funzioni di supporto come la formazione, gli uffici amministrativi, la mensa e le aree dedicate alla maternità, tutte connesse, ma distribuite in modo da garantire privacy, comfort e continuità operativa.

L'ospedale si estenderà su una superficie complessiva di 80.300 metri quadrati dedicati alle funzioni sanitarie, progettata per accogliere fino a 470 posti letto, di cui 32 specificamente destinati alla terapia intensiva. La dotazione logistica prevede la realizzazione di circa 1.200 posti auto, per garantire un'adeguata accessibilità a pazienti, visitatori e operatori. L'area tecnica e la centrale tecnologica occuperanno complessivamente circa 20.000 metri quadrati, un'estensione significativa che permetterà di ospitare le infrastrutture impiantistiche e i servizi di supporto indispensabili per assicurare la continuità e l'efficienza delle attività ospedaliere. Il blocco operatorio sarà concepito per rispondere alle esigenze più complesse, con 7 sale operatorie principali, 2 sale dedicate alle emergenze e 1 sala ibrida per interventi che richiedono integrazione tra chirurgia tradizionale e tecniche di imaging avanzato. La diagnostica per immagini sarà uno dei fiori all'occhiello della struttura, con un'articolazione che comprenderà, per l'area dell'urgenza, un laboratorio di emodinamica interventistica, una radiologia RX dedicata ai politraumi, una RX telecomandata e una TAC. Per le attività ordinarie, saranno presenti 6 sale RX, 7 sale ecografiche, 1 sala di ecografia interventistica, 2 risonanze magnetiche, 3 TAC, 5 apparecchiature per mammografia, 1 sala per biopsia Fischer per esami specialistici e due OPT per ortopantomografie.

Il blocco parto sarà attrezzato con 5 sale travaglio, di cui una convertibile, e 2 sale operatorie dedicate, per garantire un'assistenza completa e sicura alle future madri. Infine, saranno realizzati ben 63 ambulatori di base e specialistici, pensati per offrire un'ampia gamma di prestazioni ambulatoriali in un contesto funzionale e moderno, capace di rispondere efficacemente ai bisogni di salute della comunità. Questo complesso sistema ospedaliero sarà un punto di riferimento regionale per la qualità delle cure e l'innovazione tecnologica, combinando spazi altamente performanti con un'organizzazione pensata per la massima efficienza operativa e il benessere di pazienti e operatori.

L'organizzazione degli spazi e il layout funzionale generale sono stati definiti a seguito di un'approfondita fase di analisi con l'obiettivo prioritario di garantire un'ottimale efficienza gestionale, un elevato livello di sicurezza sanitaria e un agevole orientamento per utenti, pazienti e personale. Tale impostazione ha permesso di articolare in modo razionale i percorsi, distinguendo nettamente i flussi pubblici, logistici e sanitari, così da

ridurre al minimo le interferenze e migliorare la capacità operativa quotidiana. Il layout ha previsto un'organizzazione in macro-blocchi funzionali verticali per garantire la massima chiarezza distributiva, un'agevole gestione delle attività ospedaliere e la possibilità di future riconfigurazioni senza impatti significativi sull'attività clinica. Le superfici sanitarie complessive sono state dimensionate per rispondere alle esigenze assistenziali individuate. Nel dettaglio, sono stati previsti:

- **Piano interrato (S1)**, dedicato alla **logistica e alle funzioni tecniche strategiche**, cuore dei servizi di approvvigionamento e del trasporto automatizzato orizzontale, oltre al parcheggio riservato al personale sanitario e agli addetti. Questa scelta ha consentito di isolare i flussi logistici da quelli dell'utenza, riducendo i rischi di contaminazione e incrementando la sicurezza.
- **Piano terra (P0)**, concepito come livello degli accessi principali, **primo livello della piastra "High Care"** con pronto soccorso, area diagnostica baricentrica tra area pubblica e urgenza, ospedale diurno con ambulatori e dialisi. A questo livello sono stati collocati servizi sensibili, come la morgue e il reparto psichiatrico, dotato di aree verdi private per garantire il benessere degli utenti più fragili e il rispetto della privacy.
- **Piano primo (P1)**, "High Care", dedicato alle **sale operatorie e agli spazi per attività chirurgiche**. Qui sono stati previsti anche i servizi ambulatoriali specialistici, le aree di supporto, le funzioni amministrative e l'area materno-infantile, così da concentrare le funzioni ad alta intensità clinica.
- **Piano secondo (P2)**, **interpiano tecnologico** ad accesso esclusivo ai manutentori, progettato per massimizzare la separazione tra attività tecniche e sanitarie, semplificando le operazioni di manutenzione e aggiornamento impiantistico; il basamento della manica delle degenze ospita la funzione più pubblica del **poliambulatorio**, con ambulatori dedicati alla medicina, alla chirurgia e oncologia.
- **Piani Degenza (P3-4-5)** destinati alle **degenze**, articolate per garantire la massima flessibilità nell'uso delle aree secondo le esigenze cliniche del momento. Le degenze sono state concepite secondo standard alberghieri, con finiture in legno, arredi integrati e soluzioni che permettono al paziente di regolare in autonomia luci, schermature e microclima dal letto, a beneficio del comfort e del benessere.

La distribuzione interna sarà supportata da una maglia strutturale asimmetrica, con campate di 7,50 metri per 9,00 metri, scelta per garantire la massima flessibilità sia nelle unità di degenza sia nelle aree di diagnosi e cura. Tale soluzione assicurerà la possibilità di integrare facilmente tecnologie avanzate nei reparti ad alta complessità evitando inefficienze tipiche di maglie strutturali eccessivamente ampie. Il progetto pone come obiettivo la massima flessibilità nel tempo, sia a livello macro, grazie alla maglia strutturale regolare, interpiani superiori ai 4 metri, capacità portante degli impalcati adeguata e cavedi impiantistici collocati in posizione strategica, sia a livello micro, con degenze organizzate per intensità di cura, aree chirurgiche e servizi ambulatoriali progettati per poter essere facilmente riorganizzati o riconvertiti in base alle evoluzioni delle esigenze sanitarie.

La progettazione ha previsto collegamenti orizzontali e verticali brevi ed efficienti, aggregando funzioni che necessitano di prossimità in colonna o in orizzontale: ad esempio, la contiguità verticale tra DEA e blocchi operatori o quella orizzontale tra terapie intensive e blocco operatorio al piano primo, così come la relazione tra blocco parto e DEA. Ogni area funzionale omogenea sarà dotata di un adeguato numero di ascensori, montalettighe e montacarichi, differenziati per le diverse utenze (emergenza, visitatori, personale sanitario, logistica), mentre il connettivo pubblico sarà attentamente separato dai flussi sanitari e logistici. La gestione dei flussi logistici interni sarà supportata da un sistema di trasporto automatizzato pesante (AGV), in grado di raggiungere tutte le aree operative senza interferire con altre funzioni ospedaliere. A integrazione del sistema di trasporto principale, un impianto di posta pneumatica consentirà di movimentare analisi, sacche di sangue, farmaci e documenti in modo rapido e sicuro, collegando i reparti con il laboratorio analisi e contribuendo a liberare risorse infermieristiche da attività non core.

Il **Piano Interrato (S1)** riveste un ruolo strategico per il corretto funzionamento dell'intera struttura, in quanto accoglie le principali funzioni logistiche e a supporto dei reparti sovrastanti. Al suo interno si concentrano percorsi tecnici, depositi, locali di servizio, aree per la gestione dei rifiuti e spazi destinati alla distribuzione dei materiali e dei beni sanitari, garantendo la separazione tra flussi puliti e sporchi. La sua configurazione sarà fondamentale per assicurare efficienza operativa, accessibilità impiantistica, continuità dei servizi e sicurezza nella gestione delle attività ospedaliere.

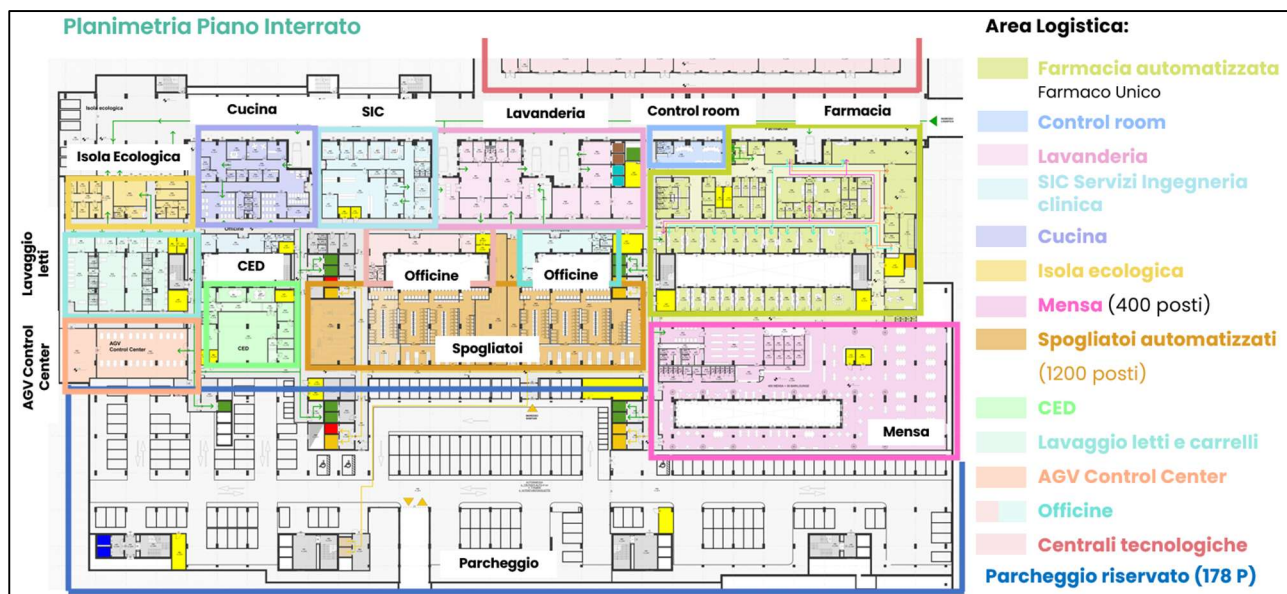


Figura 33 – Distribuzione funzionale piano interrato (Tecnicaer Engineering S.r.l.)

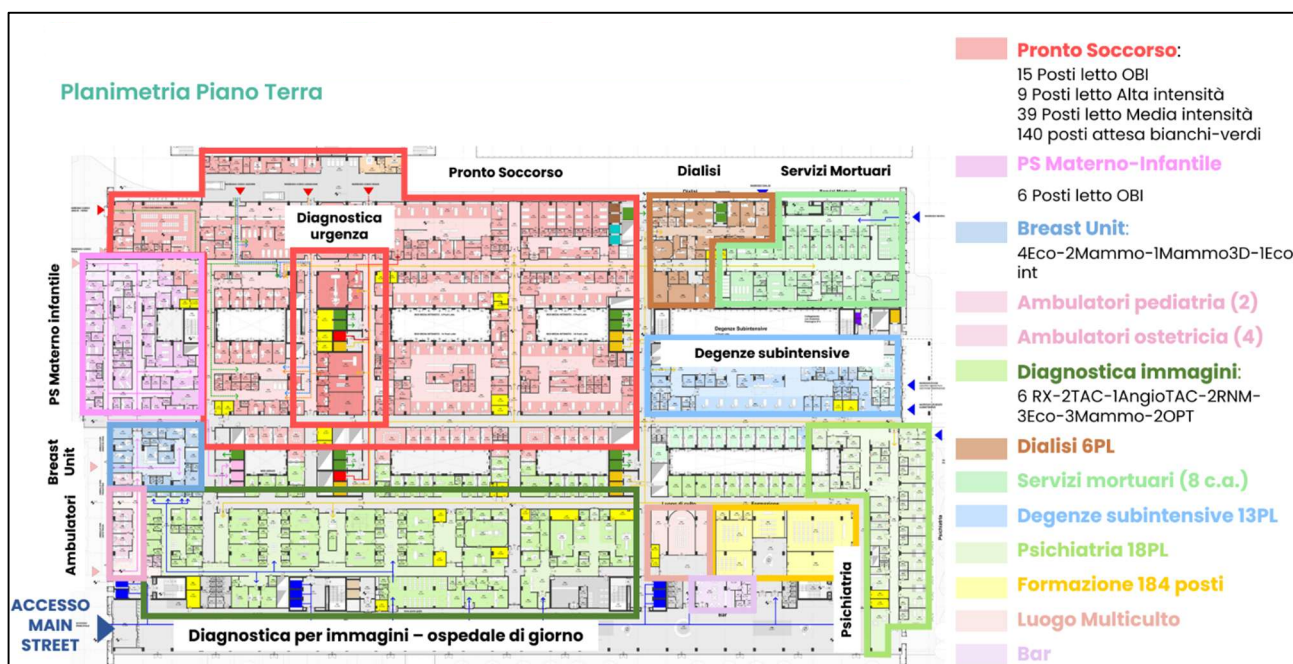


Figura 34 – Distribuzione funzionale piano terra (Tecnicaer Engineering S.r.l.)

Al **Piano Terra (P0)**, l'integrazione funzionale tra l'ospedale di giorno, i servizi al pubblico e il pronto soccorso costituisce il nucleo operativo e strategico del sistema Ospedale; rappresenta un modello assistenziale avanzato, dedicato a prestazioni diagnostiche, terapeutiche e chirurgiche a ciclo breve, riducendo i ricoveri tradizionali e ottimizzando le risorse. I servizi al pubblico proposti lungo la "Main Street" (accoglienza, sportelli amministrativi, farmacia, punti informativi, aree commerciali) garantiscono

accessibilità, orientamento e supporto all'utenza, mentre il pronto soccorso diventa il fulcro dell'emergenza-urgenza, richiedendo tempi rapidi, percorsi separati e alta intensità assistenziale. La messa a sistema di queste funzioni, attraverso una progettazione integrata e la collocazione strategica nella piastra pubblica dell'ospedale di Cambiano, assicura la continuità del percorso di cura, il corretto smistamento dei flussi e l'efficienza operativa, configurando un nodo centrale per l'intero organismo ospedaliero.

Nel programma funzionale sanitario, il **piano dell'High Care (PI)** rappresenta una componente centrale della piastra sanitaria, costituendo un livello ad alta intensità assistenziale in grado di rispondere a bisogni clinici complessi e critici. Questo piano ospiterà reparti come Day Surgery, Terapia intensiva, blocco operatorio, recovery room e diagnostica avanzata, garantendo tempestività, sicurezza e continuità delle cure. L'integrazione dell'High Care con le altre funzioni della piastra sanitaria, tra cui il pronto soccorso, il day hospital, le aree ambulatoriali specialistiche e la diagnostica per immagini, consente una gestione efficace dei pazienti richiedenti un'alta intensità di cura, assicurando percorsi rapidi e verticalizzati dal primo accesso fino al trattamento. La messa a sistema di queste funzioni in un'unica piattaforma organizzativa e spaziale rafforza l'identità del cuore clinico dell'ospedale, dove convergono tecnologia, competenze specialistiche e rapidità di intervento, elemento essenziale per una sanità moderna, sicura e orientata al paziente.

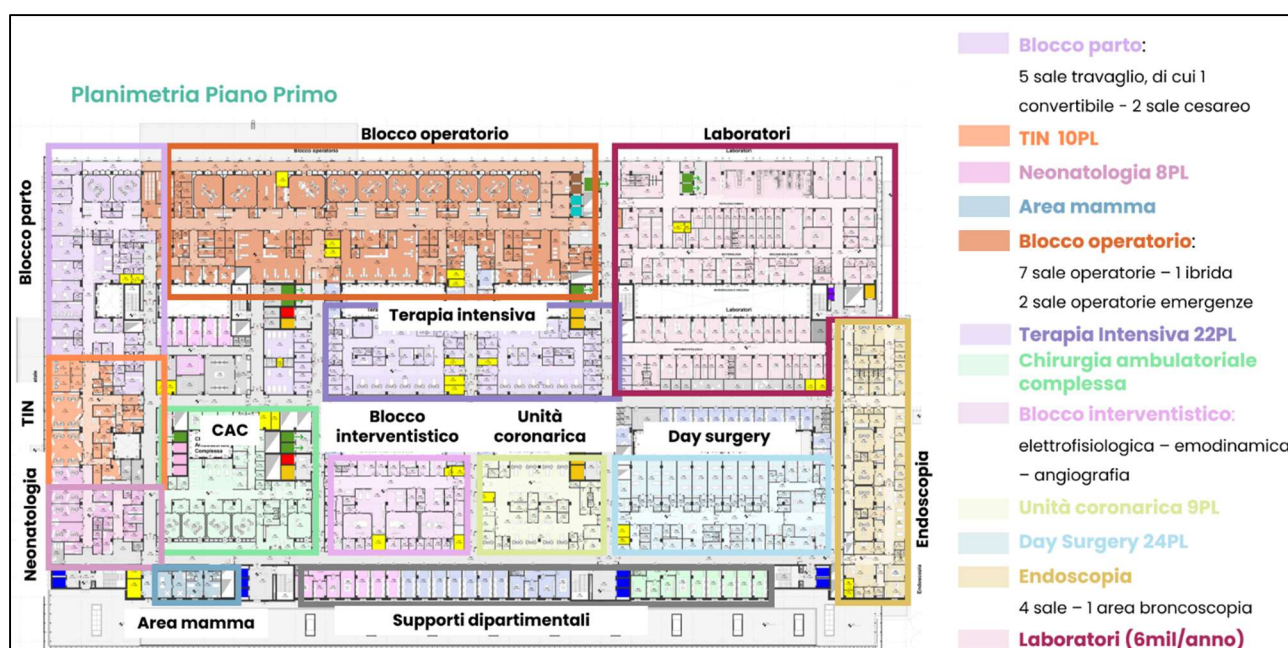


Figura 35 – Distribuzione funzionale piano primo (Tecnicaer Engineering S.r.l.)

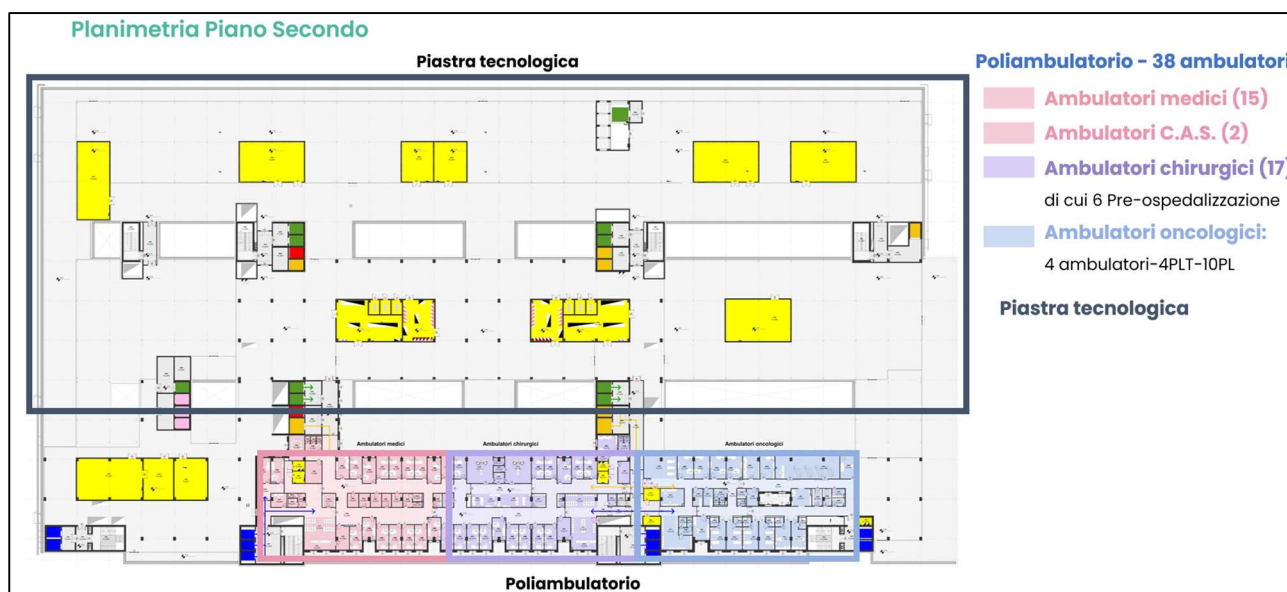


Figura 36 – Distribuzione funzionale piano secondo (Tecnicaer Engineering S.r.l.)

Il **piano tecnico centrale**, posto al secondo piano, è una componente strategica e fondamentale nella progettazione e gestione dell'Ospedale di Cambiano. Collocato tra la piastra sanitaria e i piani di degenza, questo livello ospita i vani tecnici, le dorsali impiantistiche principali (elettriche, idrauliche, HVAC, gas medicali, dati) e i locali tecnologici di supporto alle funzioni cliniche superiori e inferiori. La presenza di un piano tecnico dedicato consentirà:

- **Flessibilità impiantistica:** garantendo accesso agevolato per manutenzioni, aggiornamenti o riconfigurazioni senza interferire con l'attività clinica;
- **Separazione funzionale:** isolando le reti impiantistiche dai percorsi sanitari e pubblici, migliorando igiene e sicurezza;
- **Efficienza operativa:** ottimizzando i percorsi delle reti e riducendo le perdite di carico e i consumi.

Il piano tecnico agirà quindi come infrastruttura portante del sistema ospedaliero, rendendo possibile il funzionamento continuo e sicuro delle tecnologie sanitarie e supportando l'evoluzione dell'ospedale nel tempo.

A supporto e completamento di quest'ultimo sono state progettate due **Centrali Tecnologiche poste al P0/P1** in grado di ospitare le centrali impiantistiche più invasive, rimanendo comunque separate dal polo ospedaliero dal punto di vista formale e compositivo.

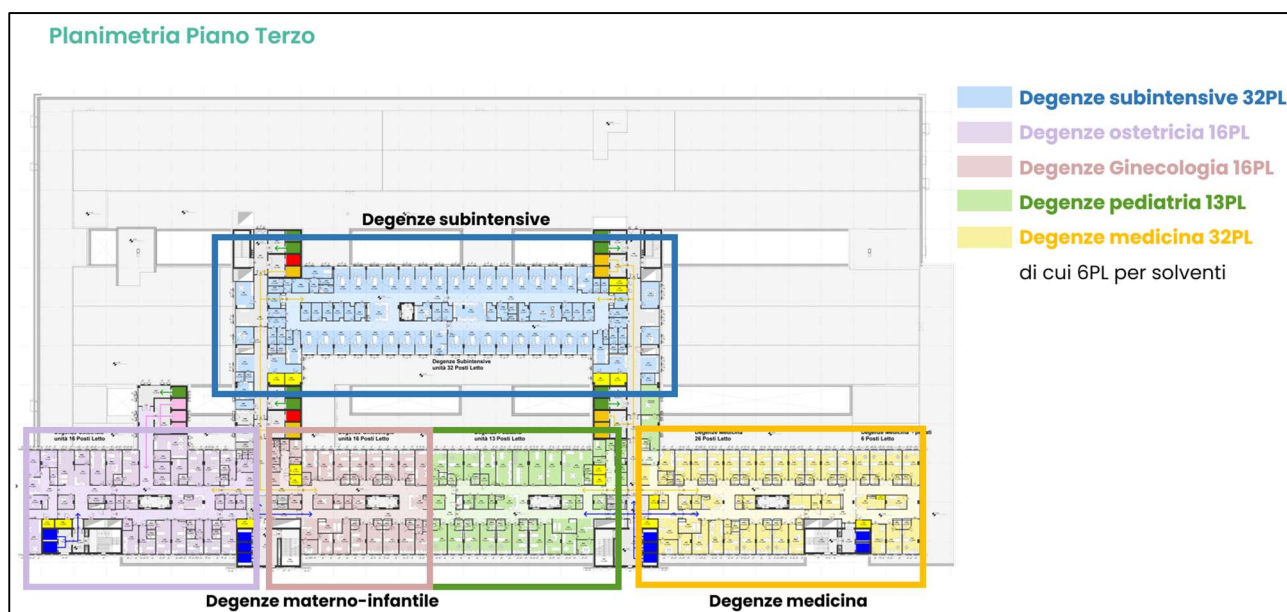


Figura 37 – Distribuzione funzionale piano terzo (Tecnicaer Engineering S.r.l.)

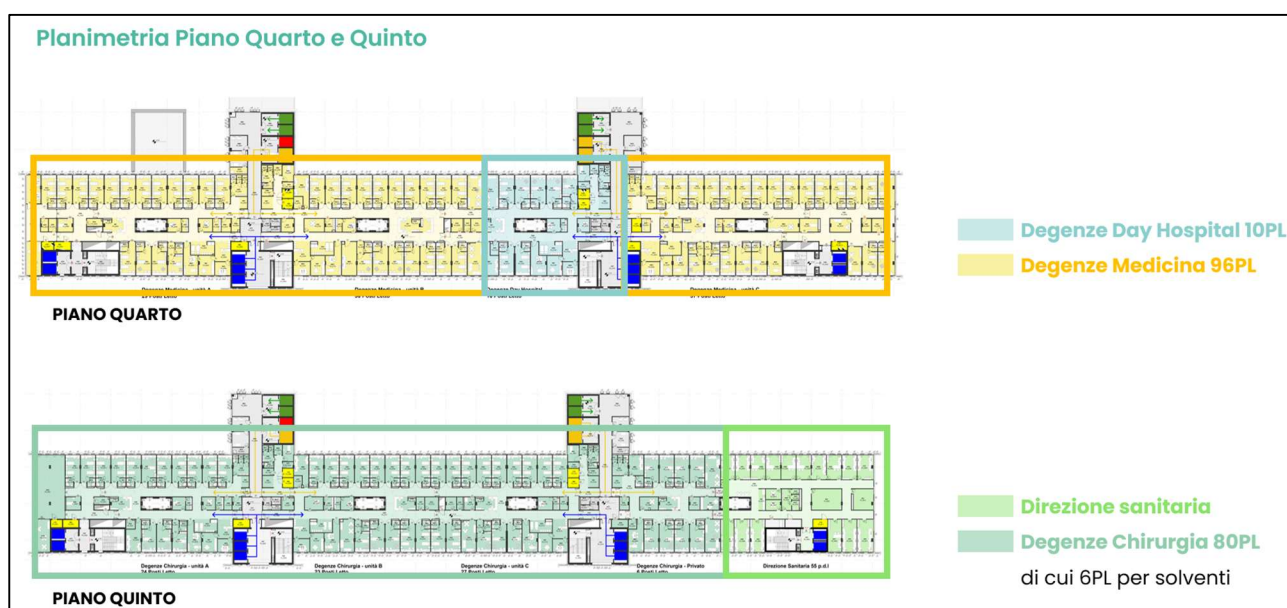


Figura 38 – Distribuzione funzionale piano quarto e quinto (Tecnicaer Engineering S.r.l.)

Nel progetto della nuova struttura ospedaliera, i **piani di degenza** sono stati concepiti come il fulcro dell'assistenza continuativa e specializzata, destinati ad accogliere reparti di alta complessità e multidisciplinarietà. Questi livelli risponderanno in modo efficiente alle esigenze cliniche di diverse tipologie di pazienti, garantendo standard elevati di sicurezza, comfort e qualità assistenziale. Il piano dedicato alla degenza subintensiva ospiterà ambienti attrezzati per pazienti critici, ma stabili, che necessitano di monitoraggio continuo e supporti ventilatori non invasivi. Saranno implementati sistemi

di monitoraggio centralizzato, pareti tecniche per la distribuzione di gas medicali e alimentazione ridondata, in modo da garantire un pronto intervento e una stretta integrazione con il piano High Care, permettendo una rapida verticalizzazione dei percorsi clinici.

Il reparto di degenza ostetrica è stato progettato per assicurare la massima sicurezza di madre e neonato, con camere singole dotate di tutte le tecnologie necessarie per il monitoraggio fetale e neonatale, nonché per favorire la continuità assistenziale nel percorso del parto. Particolare attenzione è stata rivolta al comfort, alla privacy e alla separazione dei flussi, garantendo ambienti accoglienti e protetti. Nel piano pediatrico, gli spazi sono stati organizzati per ospitare sia i piccoli pazienti sia i loro accompagnatori, con soluzioni architettoniche e impiantistiche pensate per la sicurezza, il benessere psicologico e la cura specifica dell'età evolutiva. Sono state previste aree dedicate ad attività ludico-educative e sistemi di controllo accessi che tutelassero la protezione dei minori.

La degenza chirurgica è stata sviluppata con particolare attenzione ai percorsi pre e post-operatori, collegandosi direttamente alla piastra operatoria e ai servizi diagnostici. Le stanze sono state dotate di sistemi per il monitoraggio post-anestesiologico, attacchi per fluidi medicali e pareti tecniche integrate, con percorsi differenziati per garantire la sicurezza e la rapidità nella gestione dei pazienti chirurgici.

Infine, la degenza day hospital è stata pensata come un'area funzionale e flessibile, dedicata a trattamenti diagnostico-terapeutici intensivi a ciclo breve, senza pernottamento. Sono stati previsti spazi per la somministrazione di infusioni, brevi osservazioni post-procedura e rapidità di accesso ai servizi di laboratorio e diagnostica, con arredi e impianti dedicati al comfort e alla sicurezza del paziente.

L'intero sistema impiantistico sarà sviluppato con dorsali centralizzate per gas medicali, energia elettrica, fluidi tecnologici e reti dati, garantendo affidabilità, ridondanza e facilità di manutenzione. I sistemi di sorveglianza, allarme, climatizzazione e controllo accessi saranno integrati per assicurare elevati standard di sicurezza e qualità dell'assistenza. In questo modo, i piani di degenza costituiranno il cuore residenziale della nuova struttura.

I patii, collocati all'interno delle maniche di degenza, hanno la funzione di aree filtro e di transizione, migliorando la qualità ambientale interna attraverso un'efficace ventilazione naturale e un incremento della luminosità.

Criteri per la progettazione strutturale

Dal punto di vista strutturale, i corpi di fabbrica del nuovo complesso ospedaliero dell'Azienda Sanitaria Locale TO5 sono suddivisi, in base alla loro posizione e sviluppo in elevazione, in quattro gruppi:

1. **Blocco A:** tre edifici A1, A2 e A3, nei quali al piano terra rientra il volume della camera calda e la via carrabile di accesso ad essa e che sono destinati ad ospitare il pronto soccorso (piano terra) e parte delle aree di High Care (piano terra e primo) e del piano tecnico (piano secondo) - nelle immagini seguenti in colore giallo;
2. **Blocco B:** tre edifici B1, B2 e B3 che sono destinati ad ospitare parte delle aree di High Care (piano terra e primo) e del piano tecnico (piano secondo) e i reparti di terapia subintensiva (piano terzo) - nelle immagini seguenti in colore marrone;
3. **Blocco C:** tre edifici C1, C2 e C3, nei quali al piano terra rientra il volume della Main Street e che sono destinati ad ospitare parte delle aree di High Care (piano terra e primo) e del piano tecnico (piano secondo), l'ospedale di giorno (piano secondo) e le degenze (piani dal terzo al quinto) - nelle immagini seguenti in colore verde;
4. **Blocco Centrali Tecnologiche:** due edifici destinati ad ospitare le centrali tecnologiche e contornati dalla viabilità di servizio alle stesse - nelle immagini seguenti in colore arancione.

Tutti i nove edifici del complesso ospedaliero (corpi di fabbrica A1, A2, A3, B1, B2, B3, C1, C2 e C3) sono tra loro separati, a partire dal solaio del piano terra, da giunti di ampiezza pari a 10 cm tali da impedire fenomeni di martellamento e da realizzare strutture caratterizzate da una maggiore regolarità, sia in pianta che in altezza, da contenute dimensioni planimetriche dei solai e da una riduzione, ai singoli livelli, dell'eccentricità tra il baricentro delle masse e il baricentro delle rigidezze. La platea di fondazione e il muro controterra perimetrale - nelle immagini seguenti in colore azzurro - sono invece unici per l'intero complesso ospedaliero e le caratteristiche meccaniche del terreno sottostante sono migliorate a seguito dell'esecuzione di colonne di ghiaia di diametro 70 cm, lunghezza 7 m e passo 1,50x1,50 m.

Il blocco delle centrali tecnologiche, a causa dei minori carichi trasferiti al terreno, presenta una platea di fondazione e muri perimetrali indipendenti da quelli del complesso ospedaliero.

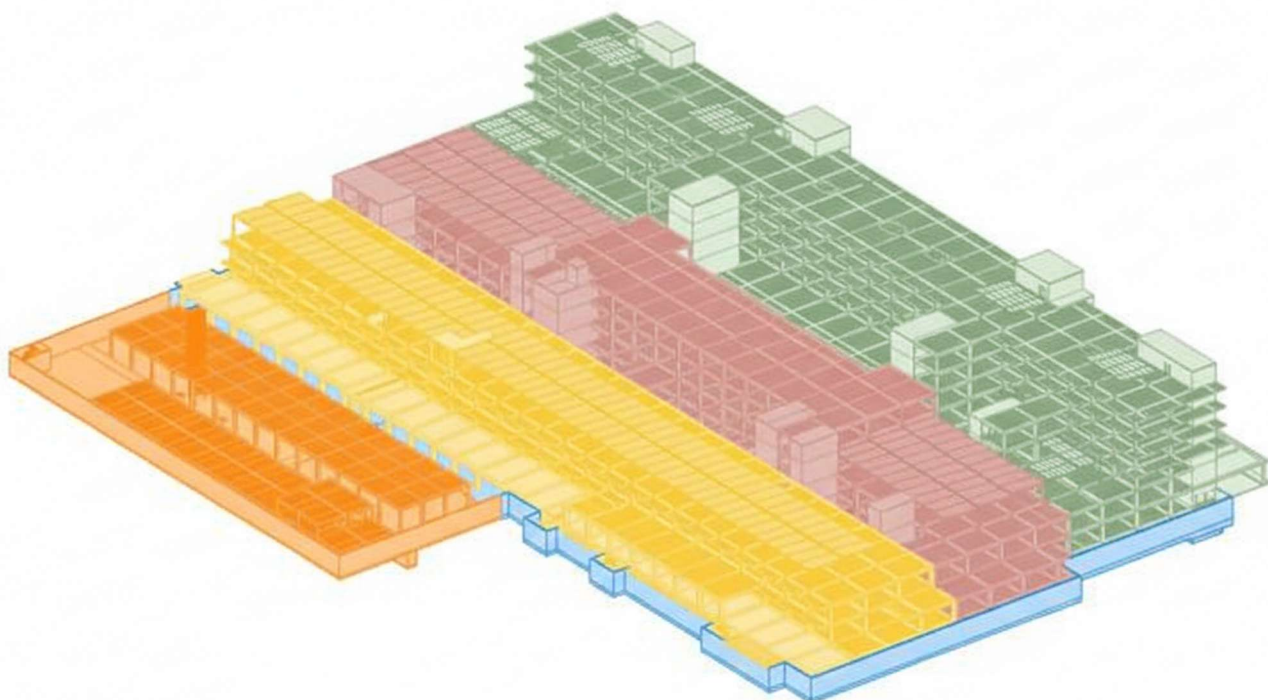


Figura 39 – Vista tridimensionale del modello strutturale dell'ospedale (Tecnicaer Engineering S.r.l.)

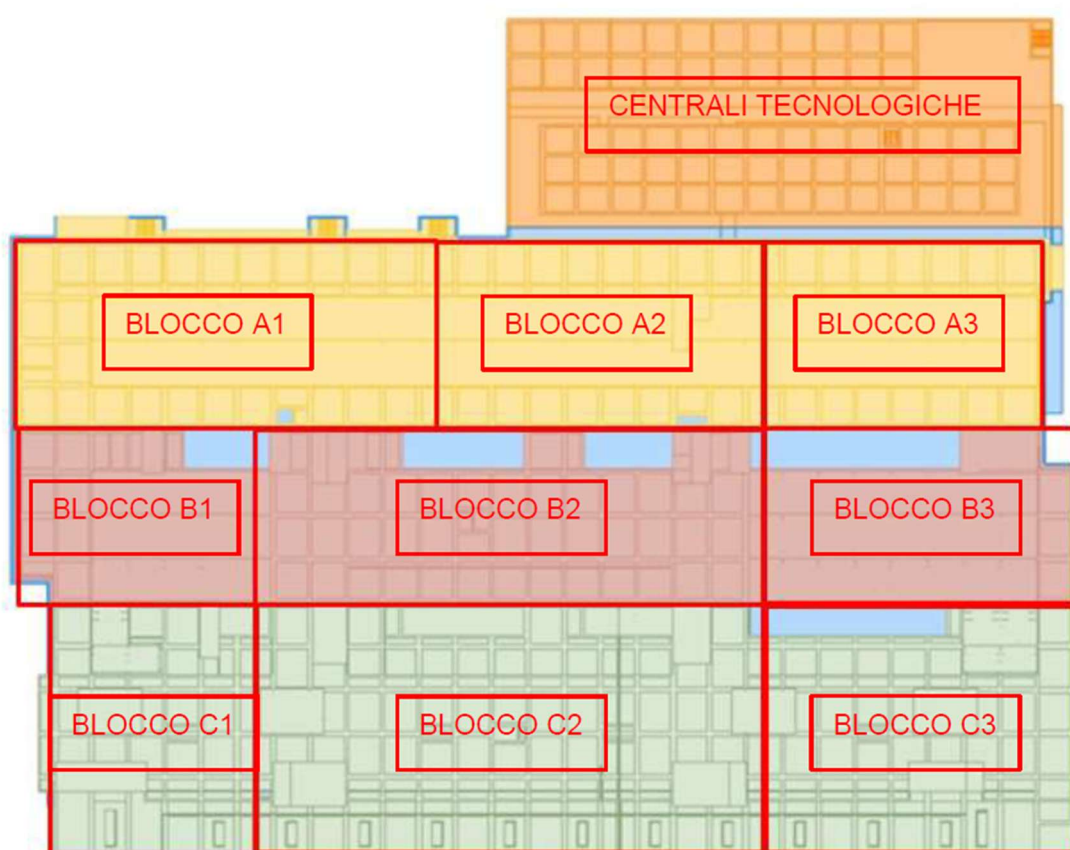


Figura 40 – Vista dall'altro del modello strutturale dell'ospedale (Tecnicaer Engineering S.r.l.)

Il progetto del nuovo ospedale, per quanto riguarda l'aspetto strutturale e materico, si basa su criteri di durabilità, flessibilità e sicurezza, coerentemente con le elevate prestazioni richieste a una struttura sanitaria complessa. Il sistema portante è realizzato prevalentemente in calcestruzzo armato, con utilizzo di calcestruzzi di classe C30/37 per le platee di fondazione e i muti controterra dell'interrato, C35/45 per le travi, i solai, le scale e le lastre predalles, C4/55 per pilastri e pareti, C25/30 per i pali di fondazione e C12/15 per i magroni. Per le armature è previsto l'utilizzo di acciaio per calcestruzzo armato B450C conforme al paragrafo 11.3.2 delle NTC18³⁸ e da precompressione conforme al paragrafo 11.3.3 delle NTC18. La scelta di questi materiali garantisce un'adeguata capacità portante, resistenza nel tempo e un buon comportamento dal punto di vista sismico.

La concezione strutturale adotta una maglia ampia con interpiani superiori ai 4 metri con lo scopo di ridurre gli ingombri degli elementi verticali e di garantire un'appropriata flessibilità distributiva, necessaria per l'adattabilità futura degli spazi ospedalieri. In ambito antisismico, la progettazione strutturale ha seguito le prescrizioni delle NTC 2018, assicurando l'operatività dell'edificio anche a seguito di eventi sismici significativi.

Criteri per la progettazione impiantistica

All'interno del nuovo polo ospedaliero è prevista un'articolata dotazione impiantistica, concepita per garantire la massima efficienza operativa, la continuità dei servizi e un'adeguata flessibilità per future espansioni. La centrale termica sarà dotata di due caldaie ad acqua surriscaldata, equipaggiate con bruciatori modulanti bi-combustibile gas/gasolio, in grado di produrre acqua surriscaldata alla temperatura di 160/130 °C. Le caldaie, di tipologia a tre giri di fumo con doppio fascio tubiero, sono progettate per ottimizzare lo scambio termico e ridurre le emissioni di ossidi di azoto, mentre l'integrazione di un economizzatore consente il recupero del calore sensibile dei fumi, incrementando ulteriormente l'efficienza complessiva del sistema. Tali generatori saranno collegati a uno scambiatore a fascio tubiero dedicato all'alimentazione di emergenza dei circuiti di riscaldamento, a garanzia della continuità operativa anche in situazioni critiche. In un locale tecnico specifico sarà installato un cogeneratore a gas, con predisposizione per una seconda unità, caratterizzato da una potenza elettrica

³⁸ Decreto Ministeriale 17 gennaio 2018, *Aggiornamento delle "Norme Tecniche per le Costruzioni"*, pubblicato nella Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, n. 42 del 20 febbraio 2018, Suppl. Ord. n. 8.

nominale di 2028 kW ed una potenza termica nominale di 2055 kW, con un rendimento elettrico pari al 44,2 % e un'efficienza globale superiore dell'89,1%, grazie al recupero del calore prodotto per l'alimentazione dei servizi ospedalieri. La sezione frigorifera sarà costituita da due gruppi frigoriferi centrifughi operanti con temperature di mandata comprese tra 7 e 12 °C e da un gruppo frigorifero ad assorbimento alimentato dal calore recuperato dal cogeneratore. Queste macchine saranno dissipate tramite raffreddatori adiabatici e torri evaporative collocate in copertura, soluzione che consente di contenere l'ingombro a terra e migliorare le prestazioni energetiche complessive. A supporto del sistema, il progetto prevede l'installazione di pompe di calore polivalenti e pompe di calore reversibili condensate ad aria, in grado di fornire simultaneamente acqua calda e refrigerata a diversi livelli di temperatura per la climatizzazione degli ambienti ed il raffreddamento delle apparecchiature diagnostiche. Inoltre, il polo tecnologico comprenderà una cabina elettrica tecnologica per la distribuzione dell'energia, centrali idriche e antincendio con vasche di accumulo, oltre a locali accessori riservati al personale tecnico manutentivo, quali depositi e spogliatoi. Il complesso è stato concepito prevedendo spazi dedicati all'espansione futura, così da garantire la possibilità di implementare nuove tecnologie o aumentare la capacità degli impianti, in particolare lato frigorifero, per soddisfare l'evoluzione delle esigenze dell'ospedale nel tempo. L'adozione di una strategia basata sulla diversificazione delle fonti di energia primaria, comprendente gas metano, gasolio, energia elettrica, cascami termici e aria esterna, unita all'impiego di macchine polivalenti capaci di produrre simultaneamente calore, freddo ed energia elettrica, consente di ottenere un'elevata sicurezza energetica e una gestione estremamente efficiente.

Le centrali tecnologiche sono concentrate in aree dedicate e facilmente accessibili dall'esterno, per favorire le operazioni di manutenzione ordinaria e straordinaria senza interferire con i percorsi sanitari e pubblici. La centrale termica, la centrale frigorifera, la cabina elettrica e la centrale dei gas medicali sono progettate nel rispetto delle normative antincendio e ambientali, prevedendo percorsi dedicati per i mezzi di soccorso e distanze adeguate tra i camini di scarico e le prese d'aria dell'edificio, al fine di evitare fenomeni di ristagno dei fumi.

Per il dimensionamento degli impianti meccanici è stato eseguito un processo di simulazione energetica oraria basato sulla caratterizzazione dei fattori climatici, sui profili di utilizzo degli ambienti e sulle diverse condizioni stagionali. In questo modo è stato possibile effettuare una valutazione puntuale dei carichi termici e frigoriferi e si è

arrivati alla scelta di un sistema impiantistico ibrido capace di combinare tecnologie diverse per coprire sia i carichi di base che quelli di picco. La produzione di energia è affidata ad un insieme di cogenerazione, pompe di calore polivalenti e reversibili, gruppi frigoriferi e caldaie ad acqua surriscaldata, per massimizzare il più possibile l'efficienza totale e ridurre il fabbisogno di energia primaria da rete.

Tabella 2 – Potenze impianti meccanici (Tecnicaer Engineering S.r.l.)

Macchina	N.	Potenza totale caldo [kW]	Potenza totale freddo [kW]	Potenza totale surriscaldata
Caldaie ad acqua surriscaldata	2	-	-	5200
Cogeneratore	1	2055	-	-
Pompe di calore polivalenti	3	4167	3153	-
Pompe di calore reversibili	2	1464	2226	-
Gruppo frigo ad assorbimento	1	-	1500	-
Gruppi frigo centrifughi	2	-	2944	-
Chiller free cooling	2	-	628	-
TOTALE		7695	10451	5200
Fabbisogno riscaldamento [kW]			6878	
Fabbisogno raffrescamento [kW]			10197	

In coerenza con i requisiti normativi, il progetto persegue il raggiungimento di standard NZEB³⁹, garantendo un'elevata quota di copertura dei fabbisogni mediante fonti rinnovabili. L'autoproduzione di energia elettrica tramite cogenerazione e la presenza di

³⁹ Gli standard NZEB (Nearly Zero Energy Building) indicano edifici a consumo energetico quasi nullo, ovvero costruzioni caratterizzate da un fabbisogno energetico molto basso, coperto in larga parte da fonti rinnovabili prodotte in loco o nelle immediate vicinanze.

un impianto fotovoltaico consentono una significativa riduzione dei consumi specifici rispetto agli ospedali esistenti, migliorando allo stesso tempo le prestazioni ambientali dell'intero complesso.

Tabella 3 – Sintesi dei risultati dell'analisi energetica (Tecnicaer Engineering S.r.l.)

	Consumo gas [Smc]	Consumo energia elettrica [KWhe]	Produzione energia elettrica [KWhe]
Riscaldamento	2.215.854	1.824.731	-
Raffrescamento	-	1.665.895	-
Produzione acqua surriscaldata	524.836	-	-
Ventilazione	-	3.149.728	-
Elettrico civile	-	6.788.856	-
Elettromedicali	-	1.200.000	-
Fotovoltaico	-	-	1.508.960
Cogeneratore	-	-	9.402.315
TOTALE	2.740.690	14.629.210	10.911.275
Autoconsumo	-	-	8.897.715
Residuo da rete	-	5.731.495	-
Immeso in rete	-	-	2.013.560

Gli impianti elettrici sono stati pensati secondo criteri di ridondanza e continuità di servizio, necessari per una struttura ospedaliera di grandi dimensioni. La distribuzione in media tensione è organizzata ad anello aperto, consentendo l'isolamento rapido di eventuali tratti guasti e di rialimentare le utenze da percorsi alternativi. Il sistema è in grado di distinguere chiaramente tra le utenze privilegiate, quelle in continuità e quelle ordinarie, assicurando l'alimentazione ininterrotta dei reparti critici e delle apparecchiature elettromedicali.

Per quanto riguarda l'impianto meccanico sono state scelte diverse soluzioni a seconda degli ambienti e dei loro requisiti prestazionali. Le degenze, per esempio, saranno dotate di soffitto radiante per garantire la massima sicurezza dal punto di vista igienico e un elevato comfort ambientale legato alla omogeneità della temperatura operativa. Adottando questo tipo di tecnologia non si crea nessuna sorgente di rumore e nessun ingombro nello spazio limitato delle camere. Inoltre, i pannelli radianti hanno una bassa inerzia termica che permette rapide risposte alle variazioni di carico. Gli spazi meno sensibili, come uffici o ambulatori, presenteranno dei ventilconvettori, ovvero terminali convettivi in grado di inseguire le variazioni dei carichi termici e garantire il rapido raggiungimento della temperatura impostata. Per i restanti reparti con elevati ricambi orari è previsto un sistema a tutt'aria per garantire il corretto grado di asepsi e la copertura dei carichi termici. Infine, la distribuzione idrico-sanitaria sarà a flussaggio continuo, evitando la presenza di collettori che possono diventare punti di proliferazione della legionella.

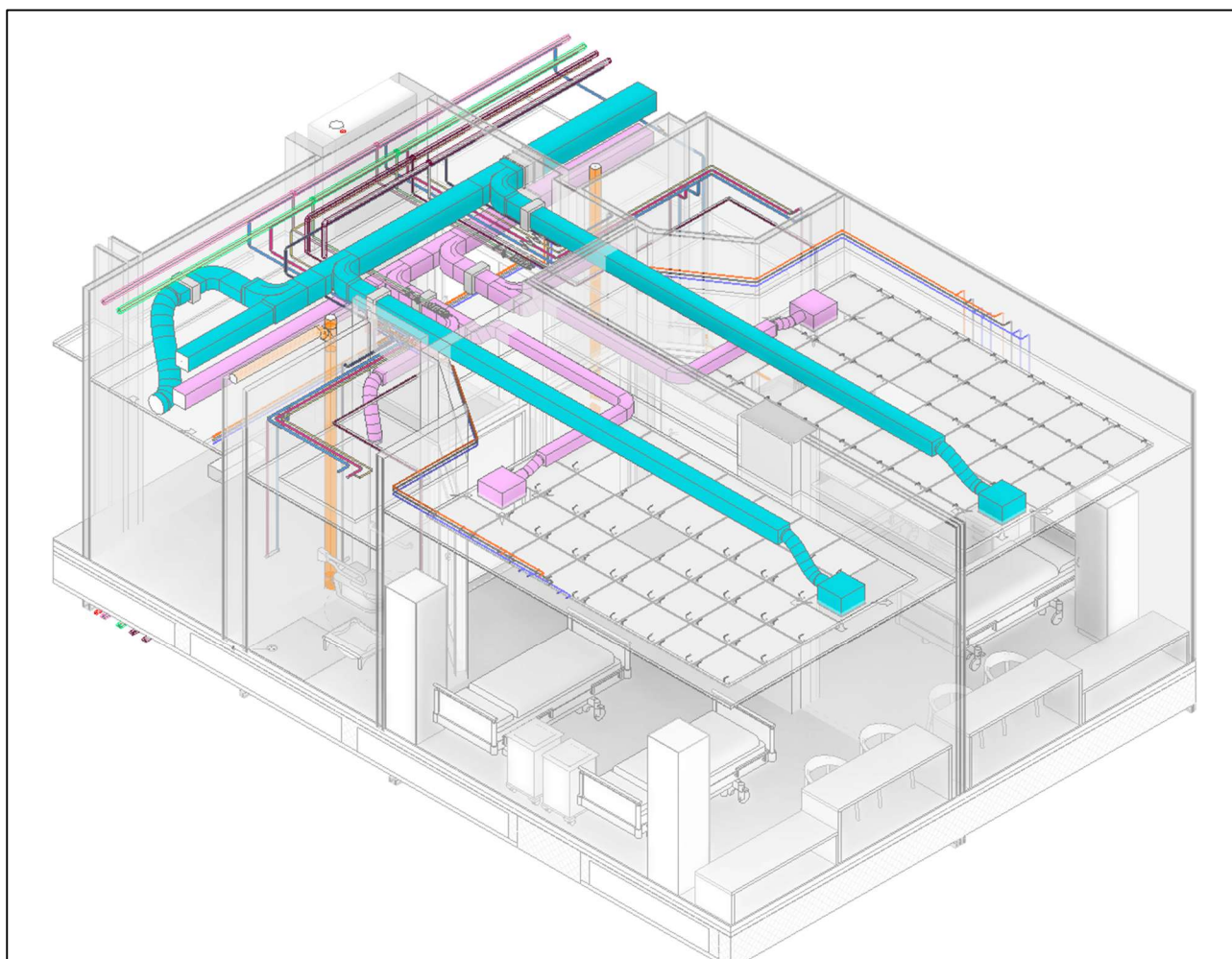


Figura 41 – Dotazioni impiantistiche meccaniche (Tecnicaer Engineering S.r.l.)

Metodologia BIM

La progettazione del nuovo ospedale è stata accompagnata in tutte le sue fasi dalla metodologia BIM. Infatti si è creato un CDE condiviso, ovvero un ambiente di condivisione dei dati (Common Data Environment) accessibile e utilizzato da tutti i soggetti coinvolti nel progetto, nel quale vengono raccolti, gestiti e scambiati in modo strutturato e controllato tutti i dati e i modelli informativi. Sono stati realizzati 14 modelli diversi suddivisi nelle varie discipline e collegati tra loro in modo opportuno per permettere il controllo delle interferenze e l'esecuzione di cicli periodici di clash detection. È stato necessario anche adottare una nomenclatura unificata sia per gli stessi modelli che per gli elementi al loro interno, per agevolare la comunicazione tra i diversi professionisti, interni ed esterni a Tecnicaer, che hanno lavorato al progetto.

Tra gli obiettivi principali che sono stati raggiunti grazie all'intervento del BIM e delle sue numerose applicazioni ci sono il coordinamento interdisciplinare, la risoluzione delle problematiche di coordinamento, la tracciabilità affidabile delle informazioni e il controllo della loro qualità. È stata anche sfruttata la quinta dimensione del BIM eseguendo una computazione parametrica basata sulla WBS⁴⁰ ottenuta automaticamente tramite i modelli realizzati, permettendo così una verifica economica funzionale e organizzata del progetto.

Il risultato dei processi applicati e delle metodologie seguite durante la progettazione e modellazione delle opere ha permesso la realizzazione di un vero e proprio Digital Twin dell'ospedale di Cambiano, grazie al quale è stato possibile creare i diversi ambienti virtuali immersivi e interattivi, eseguire la clash detection o presentare in modo più chiaro e visivo il risultato ottenuto, sia dal punto di vista tecnico che da quello estetico e architettonico.

Tabella 4 – Suddivisione del progetto nei vari modelli per disciplina (Tecnicaer Engineering S.r.l.)

ARCHITETTURA	
TW2431_PF_0302_ARC_ZZ_ZZ_M3_01	Architettonico
TW2431_PF_0303_ARC_ZZ_ZZ_M3_01	Facciate
TW2431_PF_0304_ARC_ZZ_ZZ_M3_01	Arredi e attrezzature

⁴⁰ La Work Breakdown Structure è una struttura gerarchica di scomposizione del progetto, utilizzata per dividere un'opera complessa in parti più piccole, gestibili e controllabili.

STRUTTURE	
TW2431_PF_0305_STR_ZZ_ZZ_M3_01	Strutturale
IMPIANTI MECCANICO E IDRICO-SANITARIO	
TW2431_PF_0306_AER_ZZ_ZZ_M3_01	Aeraulico
TW2431_PF_0307_PIP_ZZ_ZZ_M3_01	Tubature
TW2431_PF_0308_SAN_ZZ_ZZ_M3_01	Sanitario
TW2431_PF_0309_SCA_ZZ_ZZ_M3_01	Scarichi
IMPIANTO ELETTRICO	
TW2431_PF_0310_ELE_ZZ_ZZ_M3_01	Elettrico
TW2431_PF_0311_SPE_ZZ_ZZ_M3_01	Impianti speciali
AREE ESTERNE	
TW2431_PF_0312_LND_ZZ_ZZ_M3_00	Architettonico aree esterne – stato di fatto
TW2431_PF_0313_LND_ZZ_ZZ_M3_01	Architettonico aree esterne – nuovo progetto
TW2431_PF_0314_STR_ZZ_ZZ_M3_00	Strutturale aree esterne
MODELLO FEDERATO	
TW2431_PF_0317_FED_ZZ_ZZ_M3_01	Modello federato

2.1.3. Aree di progetto selezionate per l'analisi integrata

Per l'analisi del processo che coinvolge l'integrazione di BIM e realtà virtuale nella progettazione ospedaliera sono stati scelti due diversi ambienti dell'edificio da approfondire e per i quali sviluppare un vero e proprio spazio virtuale, partendo dal modello BIM e utilizzando software come VRex per l'analisi delle interferenze tra discipline e un motore di sviluppo (Unity) per la realizzazione di scene interattive e navigabili.

Le aree selezionate sono le seguenti:

- **Sale operatorie:** blocco operatorio del primo piano;
- **Degenze:** reparto del quinto piano dell'ospedale.

La scelta dei due ambienti permette l'analisi della metodologia BIM-VR sia dal punto di vista tecnico che da quello dell'utenza finale. Medici e potenziali pazienti possono navigare lo spazio virtuale immersivo ancora prima della sua effettiva realizzazione e fornire un riscontro puntuale sulle criticità rilevate.

Sale operatorie

Il blocco operatorio si trova al primo piano ed ha una superficie di circa 3500 m². All'interno di questo reparto sono presenti le seguenti sale operatorie:

- Una **sala operatoria di emergenza** (SOZ)
- Una **sala operatoria di emergenza di ortopedia** (SEO)
- Una **sala operatoria ibrida** (SOB)
- Sette **sale operatorie di elezione** (SOE)

Oltre alle sale operatorie sono presenti degli ambienti dedicati a ricondizionamento, pulizia e disinfezione dei tavoli operatori, servizi igienici e spogliatoi per il personale medico, numerosi depositi, alcuni uffici e zone riposo. Per i ricoverati in attesa di intervento è stato predisposto un locale di preparazione sempre supervisionato, mentre post-operazione i pazienti verranno portati nella zona risveglio, dotata degli appositi lettini.

Alcune sale operatorie, come quella ibrida al primo piano, presentano una zona di controllo. Si tratta di un altro locale adiacente che attraverso delle aperture vetrate permette di osservare da fuori l'operazione. Inoltre, per accedere alla sala il medico passa per una zona di preparazione all'interno della quale esegue un lavaggio chirurgico approfondito delle mani e degli avambracci prima di mettere i guanti e procedere all'intervento.

I locali presenti in questo reparto sono stati progettati come ambienti ad altissimo controllo igienico, funzionale e tecnologico, concepiti per garantire massimi livelli di sicurezza per i pazienti e per il personale sanitario, nel rispetto degli standard ospedalieri e delle normative vigenti.

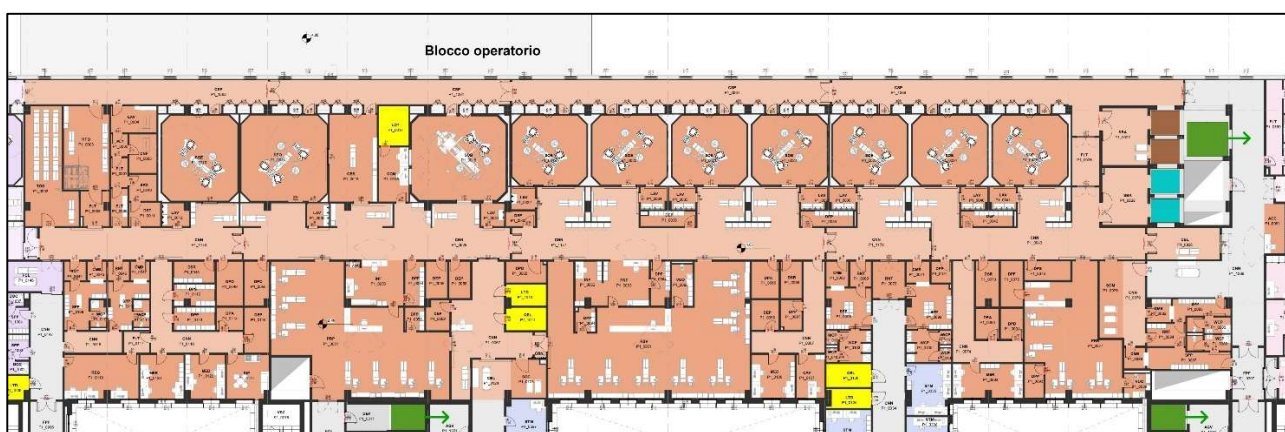


Figura 42 – Pianta del blocco operatorio al P1 (Tecnicaer Engineering S.r.l.)

Le sale operatorie, dal punto di vista architettonico, sono delimitate da pareti prefabbricabili sanificabili con struttura autoportante in acciaio zincato e pannelli tecnici antibatterici di spessore 90 mm. È prevista la presenza di pareti schermanti a raggi X integrate nel sistema prefabbricato in corrispondenza delle aree soggette a radiazione ionizzanti. Le compartimentazioni antincendio sono realizzate con partizioni certificate EI90, costituite da telai metallici con pannelli isolanti interposti, in modo da garantire la corretta resistenza al fuoco.

Le porte sono diverse in base alle prestazioni richieste per i vari ambienti: porte scorrevoli a tenuta ermetica (con dimensioni di 140x210 cm e 90x210 cm), porte interne tagliafuoco EI90 e porte di servizio a doppio battente per il trasferimento controllato di materiali sporchi o contaminati, come carrelli con strumenti chirurgici usati o rifiuti sanitari. Il layout degli spazi e la posizione dei locali sono stati decisi per assicurare la separazione dei percorsi pulito/sporco e la continuità delle condizioni di asepsi.

Il controsoffitto ha un ruolo fondamentale dal punto di visto impiantistico e igienico, soprattutto in luoghi delicati come le sale operatorie di un ospedale. Infatti è prevista la presenza di un controsoffitto ispezionabile in quadrotte metalliche a tenuta ermetica (600x600 mm), integrato con fasce di compensazione in lastra continua di cartongesso. Negli altri locali, invece sono adottate le quadrotte metalliche radianti, che contribuiscono al comfort termoigrometrico senza compromettere la pulizia e la sterilità dell'ambiente.

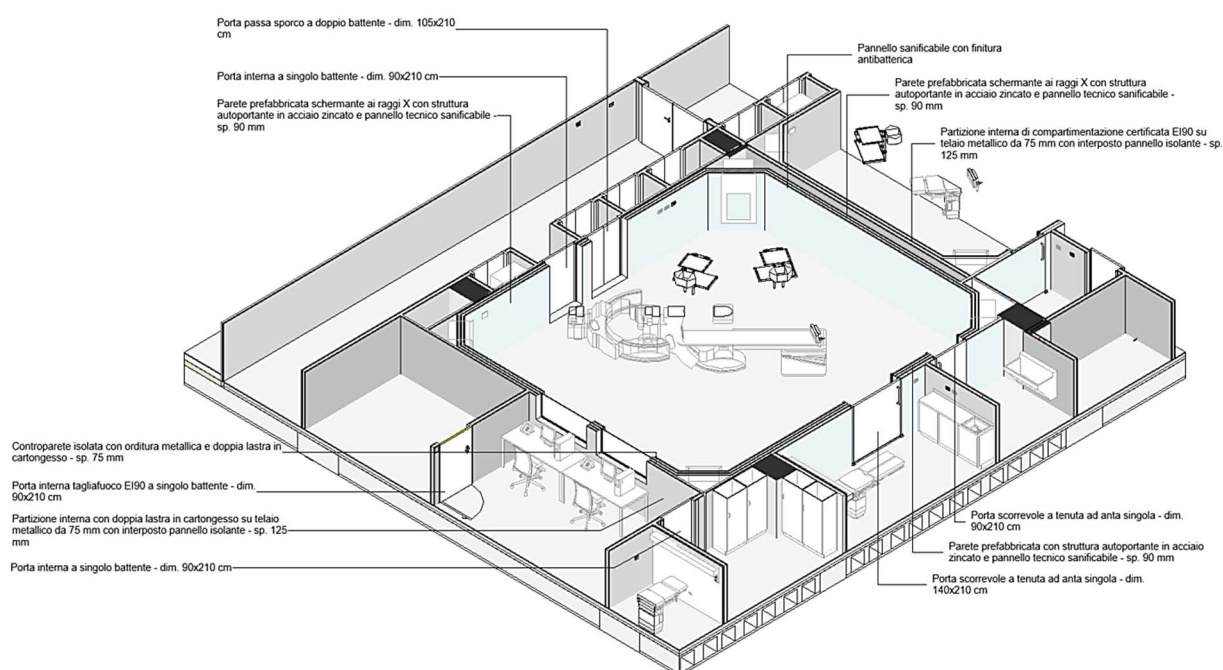


Figura 43 – Spaccato architettonico assonometrico di una sala operatoria (Tecnicaer Engineering S.r.l.)

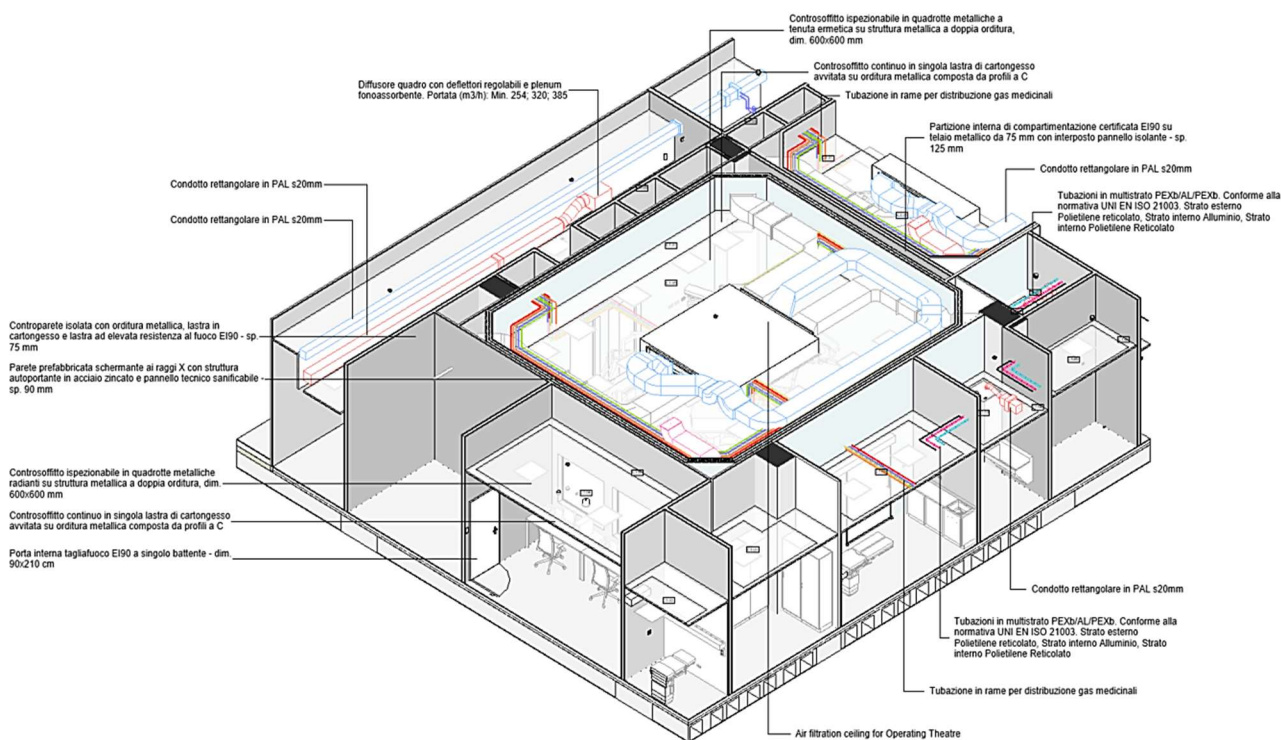


Figura 44 – Spaccato impiantistico assometrico di una sala operatoria (Tecnicaer Engineering S.r.l.)

Per quanto riguarda le finiture interne, le pareti sono rivestite da pannelli tecnici sanificabili in Corian⁴¹ o materiale equivalente dotati di guarnizioni in silicone antibatterico di tipo platinico per rispondere ai requisiti di sanificabilità, durabilità e controllo delle cariche elettrostatiche. Il pavimento è realizzato in PVC omogeneo pressato statico-dissipativo, idoneo per ambienti a traffico intenso, resistente agli agenti chimici, antibatterico e antiscivolo.

Dal punto di vista degli impianti meccanici, è previsto un sistema HVAC dedicato ad alte prestazioni. Canalizzazione aerauliche con rivestimento interno autopulente e antimicrobico si occupano della distribuzione dell'aria. Il soffitto filtrante della sala operatoria è progettato per garantire flussi controllati e un'adeguata qualità dell'aria nella zona operatoria. Il sistema impiantistico è poi completato da tubazioni per la distribuzione dei gas medicali in rame e le reti idrico-sanitarie realizzate con tubazioni multistrato conformi alla normativa UNI EN ISO 21003⁴². Sarà anche presente una gabbia

⁴¹ Il Corian è un materiale composito innovativo, una "pietra acrilica" composta per un terzo da resina e due terzi da minerali naturali (alluminio triidrato) e pigmenti, risultando un materiale solido, non poroso, igienico, durevole e versatile, ideali per sale operatorie, laboratori o camere bianche.

⁴² La norma UNI EN ISO 21003 definisce i requisiti per i sistemi di tubazioni multistrato utilizzati per le installazioni di acqua calda e fredda negli edifici.

di Faraday, ovvero un involucro conduttore che blocca i campi elettrici esterni per proteggere le apparecchiature sensibili.

Nel complesso le sale operatorie, così come l'intero reparto preso in analisi, sono progettate per essere uno spazio altamente integrato, in cui tutte le discipline, dall'architettura, agli impianti e ai materiali, concorrono a creare un ambiente sicuro, controllato e tecnologicamente all'avanguardia.



Figura 45 – Vista della sala operatoria (Tecnicaer Engineering S.r.l.)

Degenze

Il blocco delle degenze occupa i piani dal terzo al quinto ed è caratterizzato da facciate dinamiche e luminose. Infatti il sistema di involucro di questa parte dell'edificio prevede facciate continue alternate a pannelli opachi ed elementi in aggetto che lo rendono dinamico e particolare.

Per l'analisi con la realtà virtuale è stato scelto il quinto piano, che ospita tre reparti di degenze di chirurgia pubbliche per un totale di 74 posti letto, un reparto di degenze di chirurgia private e gli uffici della direzione sanitaria. Oltre alle stanze, singole e doppie, al piano sono presenti numerosi soggiorni per lo svago dei pazienti ricoverati, studi medici, zone colloqui e depositi.

La distribuzione dei flussi è stata studiata per assicurare che gli utenti esterni avessero accessi al piano differenziati rispetto a quelli del personale sanitario interno. Gli utenti

Per quanto riguarda le soluzioni tecnologiche e architettoniche adottate per le degenze, si sono previste due tipologie: stanza singola e stanza doppia. Tuttavia è importante sottolineare che questi ambienti sono studiati per essere riadattabili e facilmente convertibili, per esempio con l'aggiunta di una postazione. Ogni degenza dispone di un bagno privato le cui dimensioni rispettano gli standard per l'accessibilità da parte di utenza con disabilità. Le camere sono separate tra loro da partizioni interne con doppia lastra in cartongesso con telaio metallico e pannello isolante, mentre le pareti dei servizi igienici hanno un rivestimento idrofugo sul lato interno. Nel caso delle stanze doppie la fornitura presente è composta da due lettini con i rispettivi comodini e armadi e verso l'ampia finestra una scrivania con accanto una comoda seduta.



Dal punto di vista impiantistico le camere sono riscaldate grazie alla presenza di pannelli radianti a controsoffitto 600x600 mm. La gestione dell'aria è invece affidata a due diffusori per stanza, uno a lancio elicoidale e l'altro con deflettori regolabili, entrambi con plenum fonoassorbente. Sono presenti numerosi condotti in rame per la distribuzione di gas medicali che portano alle prese a parete situati accanto ai letti. I cavedi posizionati sotto i bagni ospitano le tubazioni di scarico in polipropilene omopolimero. Per quanto riguarda la gestione antincendio, in caso di emergenza nel corridoio subito dopo la porta della camera è presente un idrante incassato a muro.

In generale l'ambiente delle degenze è stato progettato per essere il più confortevole possibile, cercando di soddisfare allo stesso tempo gli standard di igiene e sicurezza richiesti da un ospedale e i requisiti di comfort interno che ogni paziente merita. La presenza di ampie finestre con affaccio sulle montagne e il paesaggio circostante e l'inserimento di aree comuni e soggiorni nel reparto aiutano a creare un contesto luminoso, positivo e terapeutico nel quale il processo di guarigione risulti il più sereno possibile.

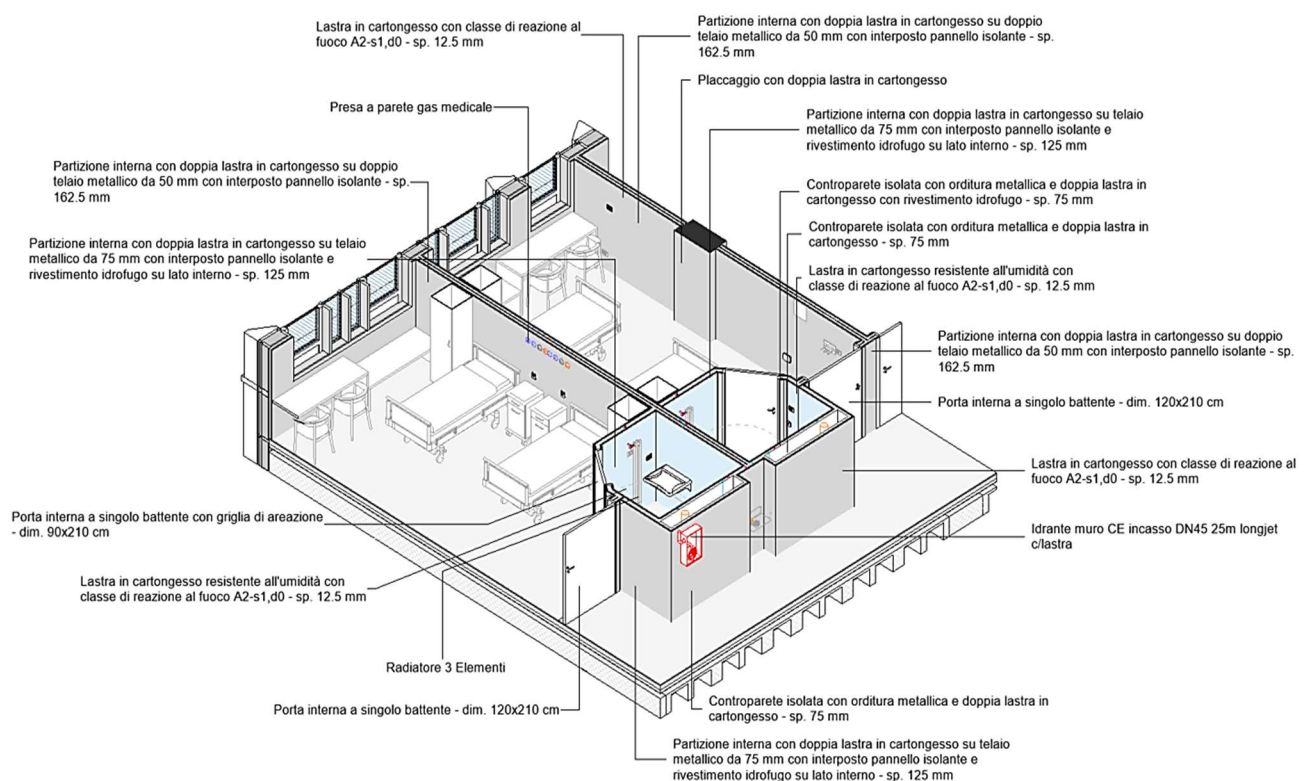


Figura 48 - Spaccato architettonico assometrico di degenze doppie (Tecnicaer Engineering S.r.l.)

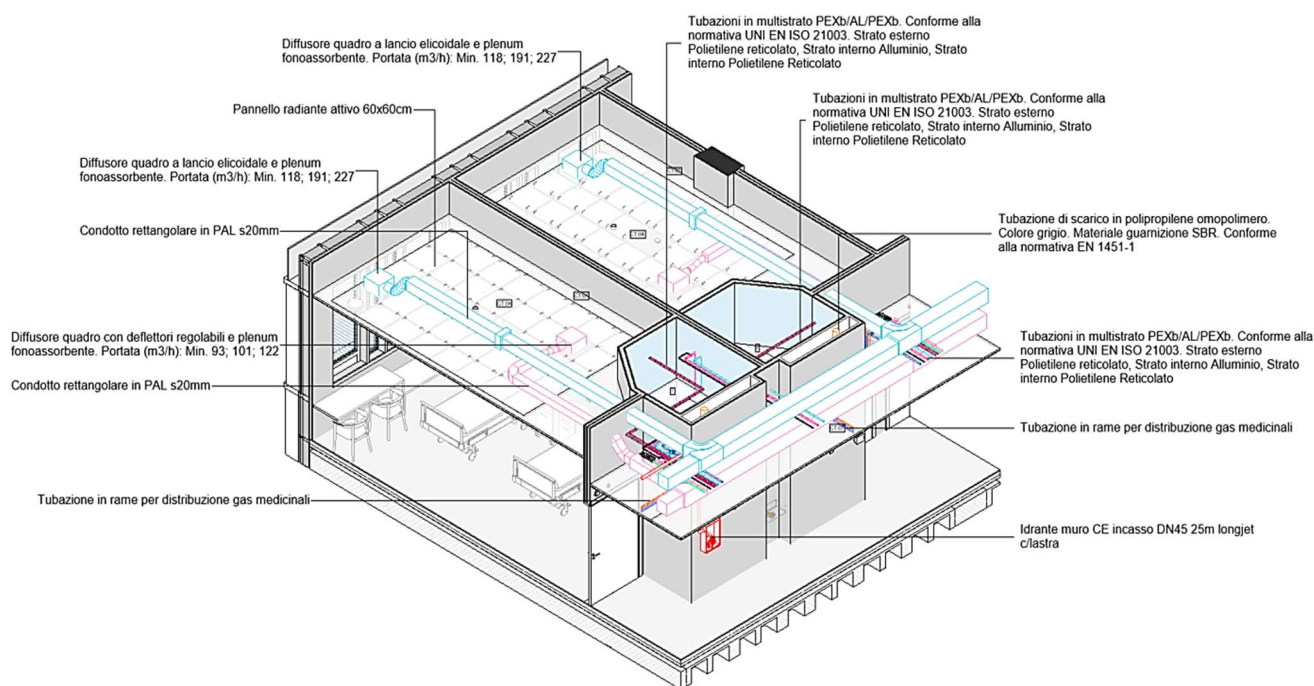


Figura 49 – Spaccato impiantistico assonometrico di degenze doppie (Tecnicaer Engineering S.r.l.)

2.2. Workflow dal modello BIM all'interfaccia VR

Il caso di studio descritto nella sezione precedente fornisce il quadro contestuale all'interno del quale è stata sviluppata la metodologia di ricerca. La struttura ospedaliera ASL TO 5 di Cambiano risulta essere un ambiente adatto per lo studio dell'integrazione tra Building Information Modeling e realtà virtuale, in quanto unisce la complessità architettonica con la presenza di molteplici attori coinvolti nella progettazione e gestione degli spazi sanitari.

Gli ospedali sono caratterizzati da un'elevata densità di impianti tecnici, da rigorosi requisiti normativi e dalla coesistenza di diverse aree funzionali che devono operare contemporaneamente garantendo sicurezza, efficienza e comfort per pazienti, personale medico e visitatori. Queste condizioni rendono le strutture sanitarie particolarmente sensibili alle problematiche di coordinamento. Per questo motivo, rappresentano un soggetto ideale per testare la metodologia BIM-VR sviluppata.

La ricerca si muove ora dalla descrizione del caso studio alla definizione del flusso di lavoro. I paragrafi seguenti delineano il processo metodologico adottato per trasformare modelli BIM coordinati in un ambiente virtuale interattivo adatto all'esplorazione immersiva.

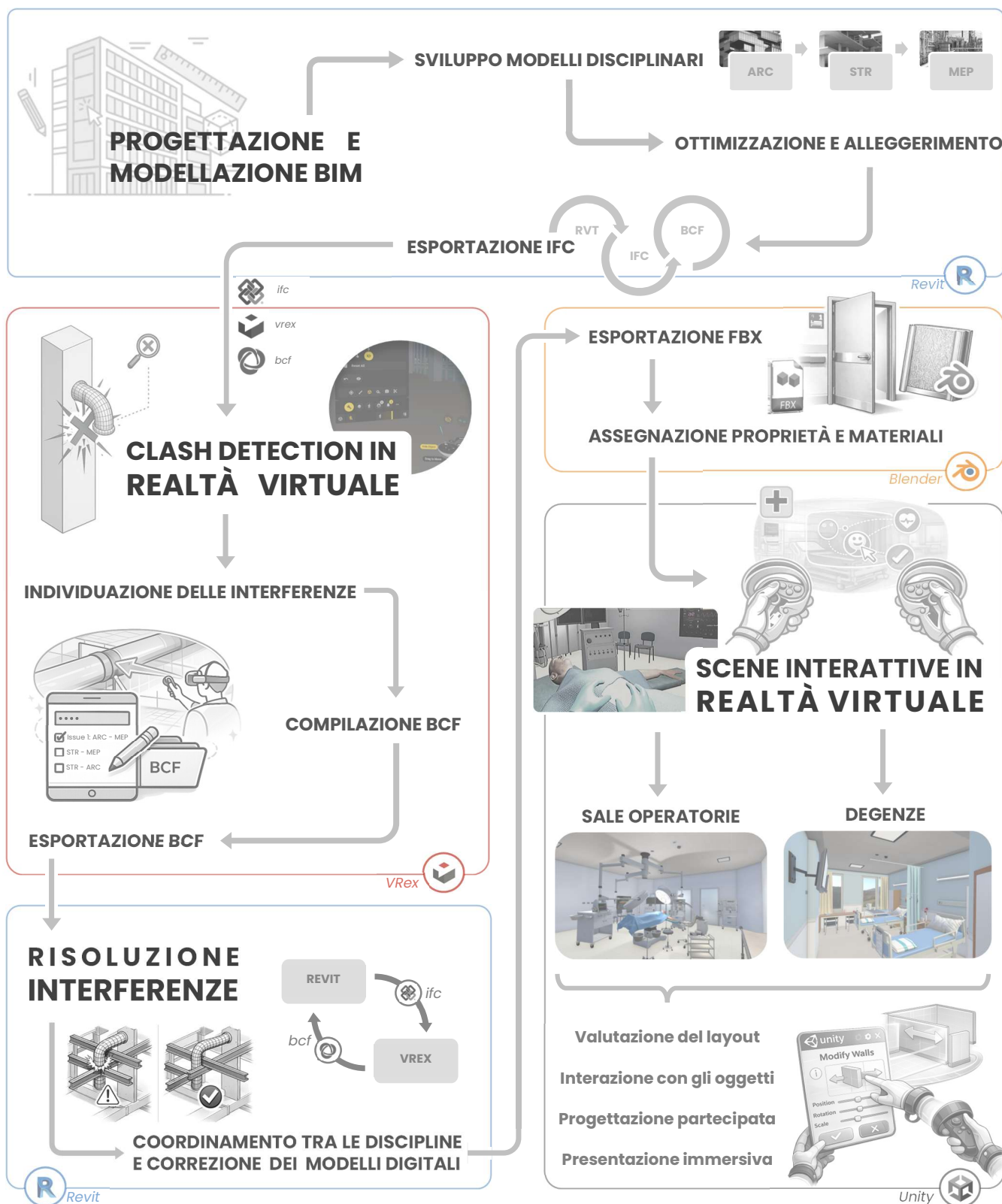


Figura 50 - Schema sulla metodologia del processo BIM-VR sviluppato e applicato al caso studio

Lo schema riportato in **Figura 50** sintetizza l'architettura operativa del workflow BIM-VR adottato, evidenziandone la suddivisione in tre fasi principali interconnesse: la strutturazione dell'ambiente informativo BIM, la gestione delle interferenze tramite clash detection immersiva e la configurazione delle scene interattive in realtà virtuale.

La metodologia descritta dall'immagine mette in evidenza la sequenza di operazioni, ma soprattutto le relazioni di interscambio tra le piattaforme coinvolte, sottolineando il ruolo dei formati interoperabili nel garantire la continuità del processo. Il flusso non si sviluppa secondo una logica strettamente lineare, bensì attraverso cicli iterativi di verifica, aggiornamento e validazione che collegano l'ambiente BIM agli strumenti di visualizzazione immersiva.

2.2.1. Progettazione e modellazione

Il processo ha origine nello sviluppo di modelli architettonici, strutturali e impiantistici coordinati, che costituiscono il fondamento informativo e geometrico dell'intero sistema. Ogni disciplina viene modellata con particolare attenzione alla strutturazione dei dati, alla coerenza dei parametri e ai requisiti di interoperabilità. L'organizzazione degli elementi del modello, i livelli di dettaglio e la gestione degli attributi svolgono un ruolo decisivo nel consentire uno scambio efficiente dei dati attraverso formati aperti. In questa fase, il modello non è solo un artefatto rappresentativo, ma un database strutturato destinato a supportare il coordinamento tra le discipline e l'interazione immersiva.

La modellazione è stata suddivisa in base alle varie discipline coinvolte con lo scopo di creare file più leggeri e interoperabili in grado di comunicare tra loro ed essere assemblati in modo appropriato per i vari scopi. Infatti, avendo diversi modelli per ogni aspetto progettuale, la successiva analisi delle interferenze risulterà più fluida e semplice da eseguire, permettendo di individuare immediatamente a che ambito appartengono gli elementi coinvolti nelle varie criticità. In particolare, la formalizzazione digitale del progetto del caso studio è stata eseguita tramite l'utilizzo del software Autodesk Revit. Quest'ultimo è un programma BIM che consente la progettazione con elementi di modellazione parametrica. A differenza dei tradizionali strumenti CAD basati principalmente sul disegno bidimensionale, Revit opera attraverso un sistema 3D orientato agli oggetti in cui i componenti architettonici, strutturali e MEP vengono realizzati come elementi intelligenti contenenti dati sia geometrici che informativi. Al centro delle funzionalità proposte da questa interfaccia c'è il concetto di modello

centralizzato. Tutte le viste del progetto (piante, sezioni, prospetti, abachi e prospettive tridimensionali) vengono generate da un database unico e coordinato. Qualsiasi modifica apportata in una vista viene automaticamente propagata all'intero modello, assicurando coerenza e riducendo in modo significativo i rischi di discrepanze tra i disegni e gli elaborati tecnici. L'ambiente parametrico di Revit permette ai progettisti di definire le relazioni tra gli elementi (ad esempio vincoli, quote, griglie o livelli), consentendo aggiornamenti automatici in caso di modifiche. Attraverso l'utilizzo di elementi chiamati "famiglie", gli utenti possono creare componenti edilizi personalizzabili con parametri realizzati ad hoc e regolabili in modo definito e strutturato, migliorando così la flessibilità e la standardizzazione. Il programma supporta anche flussi di lavoro collaborativi tramite strumenti di condivisione del lavoro che aiutano i team delle diverse discipline ad operare simultaneamente all'interno di un modello coordinato.

Ogni elemento modellato in Revit contiene dati integrati che possono essere estratti per computi quantitativi, stime dei costi, analisi delle prestazioni e gestione delle strutture. La gestione delle informazioni risulta così efficiente e automatica, trasformando la modellazione da un semplice strumento geometrico ad un sistema di progettazione completo che supporta il processo decisionale durante tutto il ciclo di vita dell'opera. Inoltre, l'interoperabilità con strumenti di analisi e piattaforme di visualizzazione, inclusi gli ambienti di realtà virtuale, amplia il potenziale applicativo di questo software, che si configura come una tecnologia centrale nei processi edili contemporanei.

Nel caso del Nuovo Ospedale ASL TO 5 di Cambiano sono stati realizzati diversi modelli in base alle varie discipline approfondite. Nella tabella che segue viene riportata la struttura della suddivisione seguita:

Tabella 5 – Suddivisione della modellazione del Nuovo Ospedale ASL TO 5

DISCIPLINA	MODELLO
Architettura	Architettonico
Architettura	Facciate
Architettura	Arredi e attrezzature
Strutture	Strutturale
Impianti idraulici	Aeraulico
Impianti idraulici	Tubature

Impianti idraulici	Sanitario
Impianti idraulici	Scarichi
Impianti elettrici	Elettrico
Impianti elettrici	Attrezzature speciali
Aree esterne	Architettonico aree esterne – stato di fatto
Aree esterne	Architettonico aree esterne – nuovo progetto
Aree esterne	Strutturale aree esterne

I modelli realizzati dallo studio Tecnicaer Engineering S.r.l., a cui è stato affidato l'appalto della progettazione dell'ospedale, e quelli a cura dei collaboratori esterni sono stati collegati in un file centrale federato da cui si possono esportare le tavole e gli elaborati grafici necessari.

Per gli scopi della clash detection e della presentazione immersiva degli spazi sanitari è necessario esportare tipologie diverse di formati di file per consentire l'interoperabilità e lo scambio dati tra le piattaforme utilizzate nelle varie fasi del processo di lavoro.

Ove necessario, vengono applicate procedure di semplificazione del modello per garantire la compatibilità con gli ambienti di visualizzazione in tempo reale, preservando al contempo l'integrità delle informazioni tecniche. Ai fini dell'esportazione dei file IFC per ciascuna disciplina, i modelli Revit sono stati sottoposti a un processo strutturato di ottimizzazione e alleggerimento volto a garantire uno scambio dati efficiente e un coordinamento affidabile. Dato l'elevato livello di complessità e densità di informazioni tipico dei progetti ospedalieri multidisciplinari, è stato necessario ridurre i modelli a dimensioni gestibili, preservando al contempo gli elementi essenziali per l'analisi tecnica. La fase di alleggerimento ha quindi incluso la rimozione di tutti gli elementi superflui o inutilizzati, come annotazioni ridondanti, famiglie non pertinenti, componenti temporanei e viste non necessarie per le procedure di coordinamento o di rilevamento delle interferenze. Questa pulizia iniziale ha ridotto significativamente il peso dei file e migliorato le prestazioni complessive durante l'esportazione e la successiva analisi.

La strategia di ottimizzazione è stata specificamente orientata all'esecuzione di attività di rilevamento delle interferenze all'interno dei reparti selezionati per l'implementazione approfondita del flusso di lavoro BIM-VR, ovvero le sale operatorie e i reparti di degenza. Aniché esportare l'intero modello dell'edificio, è stato adottato un approccio mirato per

concentrarsi esclusivamente su queste aree, consentendo un'analisi delle interferenze più precisa ed efficiente. È stato quindi definito un Livello di Dettaglio (LOD)⁴³ appropriato, bilanciando attentamente accuratezza geometrica ed efficienza computazionale. Sono stati mantenuti solo i componenti necessari per l'identificazione di conflitti spaziali e di sistema, inclusi elementi strutturali, partizioni architettoniche, controsoffitti e reti MEP pertinenti. Gli elementi eccessivamente dettagliati che non contribuivano al rilevamento delle interferenze sono stati semplificati o esclusi.

Da ciascun modello disciplinare (architettonico, strutturale e MEP) sono stati generati due "sottomodelli" dedicati: uno corrispondente al blocco operatorio e uno al piano di degenza. All'interno di ogni sottomodello, il processo di selezione ha comportato l'isolamento dell'ambito di lavoro pertinente, preservando solo i componenti necessari per il rilevamento delle interferenze ed eliminando tutti gli altri elementi al di fuori dei confini definiti. Questa segmentazione ha garantito un set di dati mirato e su misura per gli obiettivi analitici della ricerca. Una volta completati i processi di filtraggio e verifica, i sottomodelli ottimizzati sono stati esportati in formato IFC. Il risultato è stato un set di file IFC coordinato, leggero e specifico per disciplina, adatto all'analisi delle interferenze e alla successiva integrazione nel flusso di lavoro immersivo BIM-VR.

Il formato Industry Foundation Classes (IFC) è uno standard di dati aperto e neutrale sviluppato per consentire l'interoperabilità nel processo BIM. È stato creato da buildingSMART con l'obiettivo di superare i limiti dei formati di file proprietari, che spesso limitano lo scambio di dati tra diverse piattaforme software. In progetti complessi che coinvolgono più discipline e stakeholder, l'uso di formati chiusi può generare perdita di informazioni, incoerenze o frammentazione del flusso di lavoro. IFC è stato quindi concepito come uno schema condiviso e indipendente dal fornitore, in grado di garantire che i modelli di edifici digitali possano essere scambiati, letti e interpretati tra diversi strumenti di creazione e coordinamento BIM senza compromettere le informazioni geometriche e semantiche essenziali.

IFC non è semplicemente un formato di file geometrico, ma un modello di dati strutturato basato su principi orientati agli oggetti. Ogni elemento edilizio viene esportato come entità appartenente a una classe predefinita (ad esempio, `IfcWall`, `IfcSlab`, `IfcDoor`,

⁴³ Il Livello di Dettaglio (Level of Development/Detail – LOD) definisce il grado di sviluppo geometrico e informativo degli elementi di un modello digitale, normato in Italia dalla UNI 11337 (livelli A-G).

IfcFlowSegment) e contiene sia la rappresentazione geometrica che i parametri associati, come materiali, dimensioni, codici di classificazione e proprietà relazionali. Il formato organizza le informazioni attraverso una struttura gerarchica che definisce il contenimento spaziale (sito, edificio, piano), l'aggregazione degli elementi e le relazioni tra i componenti. Questa struttura ricca di dati consente ai file IFC di preservare non solo la configurazione tridimensionale dell'edificio, ma anche gli attributi informativi integrati necessari per l'analisi, il coordinamento e la gestione.

All'interno del flusso di lavoro BIM-VR sviluppato, il formato IFC ha svolto un ruolo centrale nel consentire l'interoperabilità tra Autodesk Revit e VRex. Dopo aver ottimizzato e segmentato i modelli disciplinari, il formato IFC è stato utilizzato per esportare sia le geometrie che i parametri rilevanti da Revit in modo strutturato e standardizzato. Ciò ha garantito che gli elementi architettonici, strutturali e MEP mantenessero la loro identità e classificazione una volta trasferiti nell'ambiente di coordinamento. I file IFC esportati sono stati quindi importati in VRex, dove sono stati utilizzati per eseguire analisi di clash detection e di coordinamento interdisciplinare incentrate sulle sale operatorie e sui reparti di degenza. Basandosi su un formato aperto, il flusso di lavoro ha garantito la coerenza dei dati, ridotto la dipendenza dagli ecosistemi proprietari e stabilito un solido ponte tra la creazione BIM e gli ambienti di revisione immersiva, costituendo la base per la successiva integrazione VR.

2.2.2. Individuazione e risoluzione delle interferenze

Una volta federati, i modelli disciplinari vengono importati in un ambiente di realtà virtuale immersiva per il rilevamento avanzato delle interferenze e la convalida spaziale. In questa ricerca, la piattaforma adottata a questo scopo è VRex, un'applicazione VR collaborativa sviluppata specificamente per la visualizzazione, il coordinamento e la gestione dei problemi dei modelli BIM. L'utilizzo di questo strumento trasforma il rilevamento delle interferenze da un'attività analitica puramente basata sullo schermo a una vera e propria esperienza spaziale immersiva, in cui i progettisti possono esplorare il progetto a grandezza naturale e percepire direttamente le relazioni geometriche tra componenti architettonici, strutturali e MEP.

A differenza dei tradizionali software di rilevamento delle interferenze basati su desktop, che si fondano principalmente su controlli di intersezione automatizzati governati da regole e punti di vista bidimensionali, VRex consente agli utenti di esplorare fisicamente il modello federato in un ambiente immersivo. Attraverso display montati sulla testa e

controller di movimento, gli utenti possono camminare attraverso gli spazi, ispezionare gli elementi da più prospettive, isolare discipline specifiche e regolare i filtri di visualizzazione in tempo reale. Questa interazione integrata migliora la consapevolezza spaziale e consente di percepire in modo più intuitivo interferenze impercettibili, come riduzioni di spazio, vincoli di accessibilità o conflitti negli spazi di manutenzione, rispetto alla navigazione 3D convenzionale su monitor.

La piattaforma supporta l'importazione di modelli IFC generati dal software di BIM authoring, preservando sia le informazioni geometriche che quelle semantiche. All'interno di VRex, gli elementi possono essere visualizzati, nascosti o evidenziati selettivamente in base alla disciplina o alla categoria, facilitando l'analisi mirata di intersezioni complesse. Il software consente inoltre agli utenti di attivare strumenti di visualizzazione delle interferenze che mostrano le zone di interferenza direttamente all'interno dell'ambiente immersivo. Questo feedback visivo immediato rafforza la comprensione delle interazioni tra sistemi, in particolare nelle strutture sanitarie, dove dense installazioni tecniche e rigorosi requisiti funzionali richiedono un coordinamento preciso.

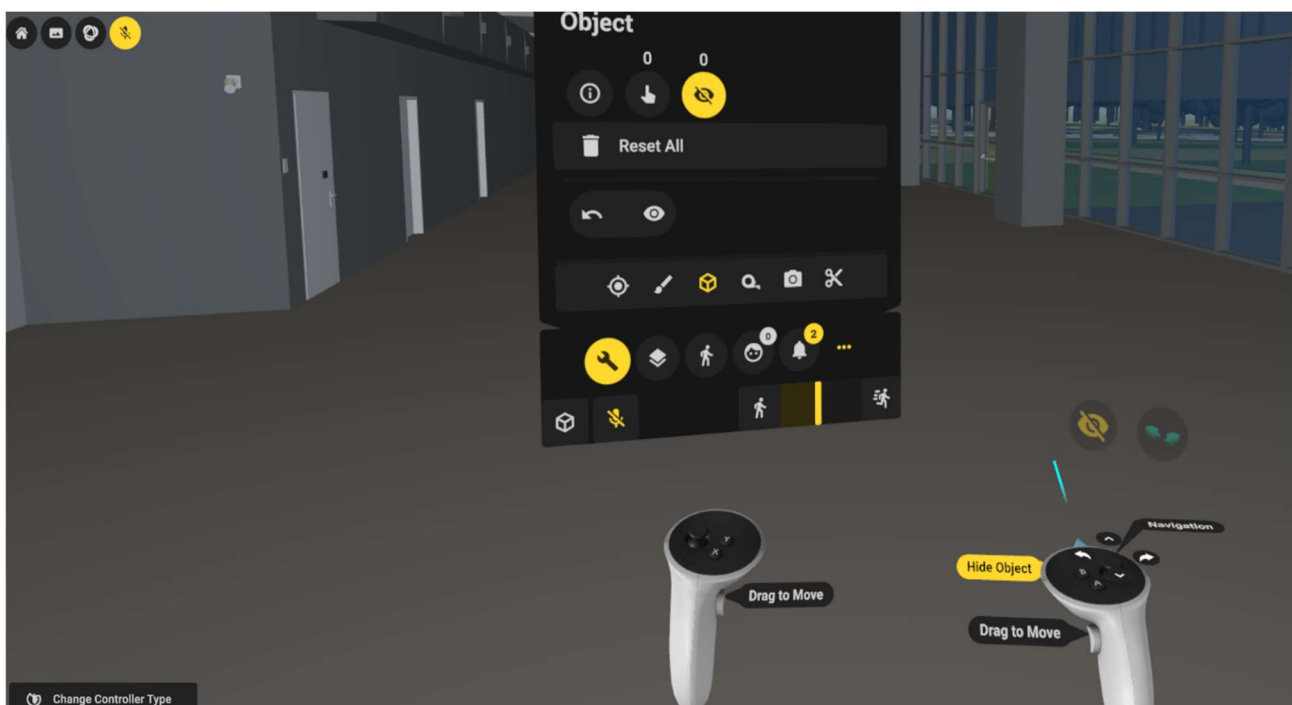


Figura 51 – Interfaccia VR del software VRex

Una caratteristica fondamentale di VRex è il suo sistema integrato di gestione dei problemi. Durante le sessioni immersive, gli utenti possono generare e documentare i conflitti rilevati direttamente all'interno dello spazio virtuale. Ogni problema può essere annotato con commenti, categorizzato per disciplina e associato a specifici elementi del modello. La piattaforma consente l'esportazione di queste problematiche in formato BCF (BIM Collaboration Format), garantendo una comunicazione strutturata e la tracciabilità all'interno del team di progetto.

Il formato BCF è un tipo di file aperto sviluppato da buildingSMART International per facilitare la comunicazione basata sui problemi all'interno dei flussi di lavoro BIM, senza la necessità di scambiare interi modelli, che possono risultare molto pesanti da inviare. È stato introdotto per risolvere una limitazione critica dei primi processi Open BIM: sebbene il formato IFC consentisse lo scambio di dati in modo efficiente, non era progettato per gestire discussioni collaborative, report di interferenze o commenti di revisione funzionale. In passato, lo scambio di modelli IFC aggiornati per ogni interferenza identificata si è rivelato inefficiente e gravoso in termini di dati e informazioni. Il BCF è stato quindi concepito come un formato di comunicazione leggero e strutturato che permette la connessione di commenti, punti di vista, immagini e metadati direttamente a elementi specifici all'interno di un modello BIM, utilizzando i loro identificatori univoci, senza duplicare la geometria e sovraccaricare i file. Dal punto di vista pratico e tecnico, un file BCF (tipicamente distribuito come cartella compressa .bcfzip) contiene strutture di dati basate su XML⁴⁴ che descrivono i singoli problemi. Ogni "issue" include una definizione del punto di vista (posizione della telecamera, direzione e piani di ritaglio), riferimenti agli elementi del modello coinvolti, commenti testuali, livelli di priorità, informazioni sullo stato e, eventualmente, snapshot che documentano visivamente il problema rilevato. Poiché BCF fa riferimento agli elementi del modello anziché incorporare la geometria, garantisce l'interoperabilità tra diverse piattaforme di creazione e coordinamento, mantenendo al contempo l'efficienza dei file e la coerenza delle versioni.

All'interno del flusso di lavoro Revit-VRex implementato in questa ricerca, BCF ha svolto un ruolo fondamentale nel consentire il rilevamento immersivo delle interferenze e l'integrazione strutturata dell'analisi svolta. Durante la revisione in ambiente virtuale condotta tramite VRex, le criticità sono state identificate direttamente all'interno del

⁴⁴ L'XML è un linguaggio di markup versatile utilizzato per strutturare, archiviare e scambiare dati in modo leggibile sia dagli esseri umani che dalle macchine.

modello importato sul software. Una volta rilevato un problema, il software ha consentito all'utente di acquisire uno screenshot dal punto di vista VR e di compilare BCF predefiniti, come titolo del problema, descrizione, disciplina, priorità e commenti. Questo processo ha garantito che ogni interferenza fosse documentata non solo visivamente, ma anche parametricamente, preservando le informazioni contestuali e tecniche generate durante la sessione immersiva.

Dopo aver completato la fase di rilevamento delle interferenze su VRex tramite l'utilizzo di realtà virtuale e visore, il file BCF compilato è stato reimportato in Autodesk Revit. Grazie alla funzionalità di importazione, ogni clash individuata risulta accessibile individualmente all'interno dell'ambiente BIM. Revit infatti identifica automaticamente gli elementi coinvolti in ogni interferenza utilizzando i relativi riferimenti degli elementi presenti nel modello e indirizza l'utente direttamente alla posizione esatta definita dal punto di vista VR salvato. Questo processo ha permesso di eliminare la necessità di ricerche manuali all'interno di modelli complessi e di ridurre in modo significativo i tempi di coordinamento. Inoltre, tutti i commenti e i metadati compilati in VRex sono visualizzabili in Revit, insieme alle informazioni parametriche complete degli elementi associati. In questo modo i progettisti possono analizzare le interferenze con una conoscenza tecnica completa, verificare i parametri degli elementi coinvolti e implementare azioni correttive dal punto di vista della progettazione e della modellazione.

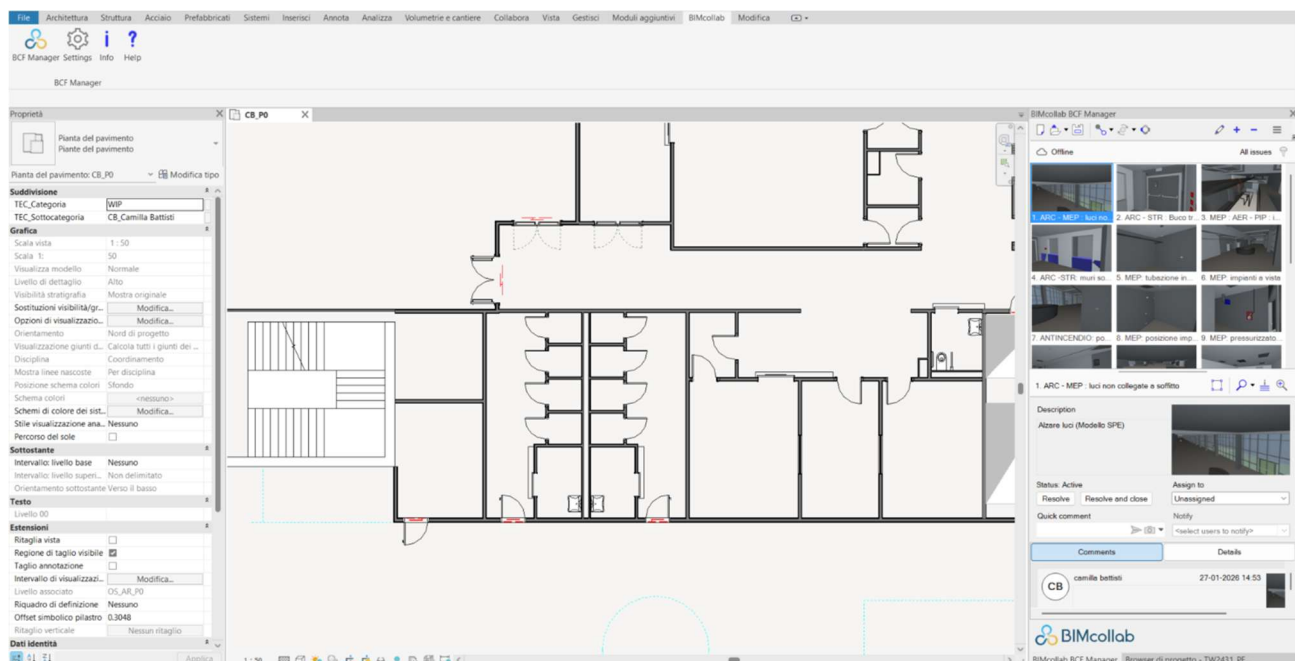


Figura 52 – Interfaccia del BCF Manager sul software Autodesk Revit

Questa integrazione bidirezionale tra revisione immersiva e authoring BIM ha migliorato notevolmente l'efficienza della correzione degli errori. Collegando l'analisi spaziale esperienziale in realtà virtuale con il monitoraggio strutturato dei problemi e la modifica del modello parametrico, il flusso di lavoro basato su IFC e BCF ha trasformato la risoluzione delle interferenze in un processo più immediato, tracciabile e funzionalmente integrato. La capacità di passare senza soluzione di continuità dal rilevamento immersivo alla correzione mirata del modello rappresenta un significativo progresso metodologico nell'interoperabilità BIM-VR, in particolare negli ambienti sanitari complessi in cui il coordinamento spaziale è fondamentale.

I conflitti rilevati non sono quindi osservazioni isolate, ma diventano parte di un flusso di lavoro iterativo coordinato. Una volta implementate le correzioni nel modello BIM, i file IFC aggiornati vengono riesportati e ricaricati in VRex per la convalida. Questo meccanismo ciclico rafforza il coordinamento interdisciplinare, riduce l'ambiguità nella comunicazione e supporta il progressivo perfezionamento del modello. Integrando la visualizzazione immersiva con il monitoraggio strutturato dei problemi, il flusso di lavoro trasforma il rilevamento delle interferenze da una procedura di controllo statica in un processo di convalida del progetto dinamico e collaborativo, particolarmente efficace in ambienti sanitari complessi e ad alta densità.

L'identificazione delle interferenze ha permesso di rilevare e correggere sistematicamente errori di progettazione e modellazione e criticità tra le varie discipline direttamente all'interno dei modelli BIM. In particolare, sono state condotte due analisi separate, corrispondenti ai due casi di studio approfonditi in questa ricerca: le sale operatorie e i reparti di degenza. Ogni modello è stato esaminato in modo indipendente al fine di garantire una valutazione mirata e specifica del contesto dei requisiti spaziali, dei layout funzionali e del coordinamento dei sistemi tecnici. Sia per i modelli delle sale operatorie che per i modelli dei reparti, tutte le interferenze rilevate sono state progressivamente affrontate attraverso cicli di correzione iterativi. Dopo ogni sessione di revisione, i problemi identificati sono stati reimportati nell'ambiente di creazione, analizzati individualmente e risolti modificando le geometrie, regolando il posizionamento degli elementi, perfezionando i vincoli parametrici o correggendo le imprecisioni di modellazione. Il processo di individuazione delle interferenze è stato ripetuto fino a quando non sono stati identificati ulteriori conflitti critici. Questa metodologia iterativa ha garantito non solo la coerenza geometrica, ma anche quella funzionale tra componenti architettonici, strutturali e impiantistici.

Di conseguenza, entrambi i modelli hanno raggiunto una versione definitiva e coordinata, priva di conflitti irrisolti e pronta per lo sviluppo delle scene VR interattive. La fase di correzione ha quindi rappresentato un passaggio cruciale nel flusso di lavoro, trasformando i modelli preliminari coordinati in ambienti digitali completamente validati, adatti alla simulazione immersiva e all'interazione.

2.2.3. Presentazione del progetto tramite VR

Dopo la risoluzione delle interferenze, il flusso di lavoro evolve dal coordinamento tecnico alla validazione esperienziale e funzionale. In questa fase, il modello BIM coordinato non viene più trattato esclusivamente come un set di dati privo di interferenze, ma come base per un ambiente di simulazione interattivo volto a valutarne la qualità spaziale, la vivibilità degli ambienti e la coerenza operativa. Prima del passaggio alla piattaforma immersiva, il modello viene sottoposto a ulteriori procedure di ottimizzazione, tra cui il perfezionamento della geometria, la semplificazione delle mesh, la riorganizzazione della gerarchia e la riassegnazione dei materiali. Queste operazioni sono necessarie per garantire l'efficienza computazionale in un ambiente di rendering in tempo reale, mantenendo al contempo l'accuratezza geometrica e la coerenza sistematica.

Prima di sviluppare gli ambienti interattivi in Unity, i modelli BIM dei due spazi studiati (sale operatorie e reparti di degenza) hanno richiesto una fase di elaborazione preliminare. I modelli, originariamente sviluppati in Autodesk Revit e coordinati attraverso il flusso di lavoro BIM-VRex, sono stati esportati per disciplina e successivamente rifiniti utilizzando il software Blender. Questo passaggio intermedio è stato necessario per convertire le geometrie BIM in asset ottimizzati adatti alla visualizzazione e all'interazione in tempo reale all'interno di un ambiente grafico e di sviluppo.

Il processo di esportazione è stato eseguito utilizzando il formato FBX (Filmbox), un formato di file ampiamente utilizzato per lo scambio di dati 3D tra software di modellazione, animazione e rendering in tempo reale. Originariamente sviluppato da Kaydara e successivamente acquisito da Autodesk, FBX è progettato per archiviare e trasferire informazioni complesse di scene digitali, tra cui geometria poligonale, strutture gerarchiche di oggetti, materiali, texture, trasformazioni, telecamere, luci e dati di animazione. A differenza dei formati principalmente incentrati sulla geometria statica, come OBJ, FBX supporta grafici di scena strutturati e mantiene le relazioni tra gli oggetti,

rendendolo particolarmente adatto ai flussi di lavoro che coinvolgono ambienti interattivi e piattaforme di realtà virtuale.

Quando esportato da Revit, ogni modello disciplinare (architettonico, strutturale e MEP) è stato convertito in file FBX preservando il posizionamento spaziale e la gerarchia dei componenti BIM. Tuttavia, a causa della natura della conversione della geometria esportata da Revit, molte famiglie parametriche sono state esportate come singole mesh poligonali, il che ne ha limitato il potenziale di interazione in un ambiente virtuale. Di conseguenza, è stata necessaria un'ulteriore elaborazione prima che questi modelli potessero essere utilizzati nella piattaforma di simulazione in tempo reale.

Per superare queste limitazioni, i modelli FBX esportati sono stati importati in Blender, un software di creazione 3D open source ampiamente utilizzato per la modellazione, l'animazione e l'editing di mesh. Blender opera su geometrie mesh poligonali e fornisce strumenti avanzati per la manipolazione di vertici, spigoli e facce, consentendo un controllo dettagliato sulla struttura degli oggetti importati. Questa funzionalità lo rende particolarmente adatto alla conversione di geometrie derivate da BIM in risorse ottimizzate per interfacce grafiche come Unity. In Blender, ogni famiglia destinata a essere presente nell'ambiente virtuale è stata analizzata e modificata individualmente. Poiché diversi oggetti BIM sono stati importati come mesh unificate, essi sono stati scomposti nei loro elementi costitutivi per consentire interazioni funzionali in VR. Ad esempio, gli assemblaggi di porte originariamente esportati come un singolo oggetto sono stati separati in componenti distinti come telaio, pannelli delle ante e maniglie. Questa scomposizione ha permesso nella scena interattiva poi realizzata di animare o manipolare gli elementi in modo indipendente.

Oltre alla separazione geometrica, ai vari componenti sono stati assegnati materiali temporanei. Queste texture segnaposto sono servite principalmente a identificare superfici e categorie di oggetti durante la fase di modellazione. La definizione finale dei materiali, inclusi texture, shader e parametri visivi, è stata successivamente implementata direttamente in Unity, dove la pipeline di rendering in tempo reale può essere completamente controllata. Un'altra operazione essenziale eseguita in Blender ha riguardato la definizione delle origini degli oggetti e dei punti di articolazione, che determinano il modo in cui gli oggetti ruotano e si trasformano all'interno della scena. Il corretto posizionamento dei perni è fondamentale per gli elementi interattivi. Ad esempio, il perno delle ante delle porte è stato posizionato lungo l'asse della cerniera per consentire un comportamento di apertura realistico nell'ambiente virtuale. La geometria

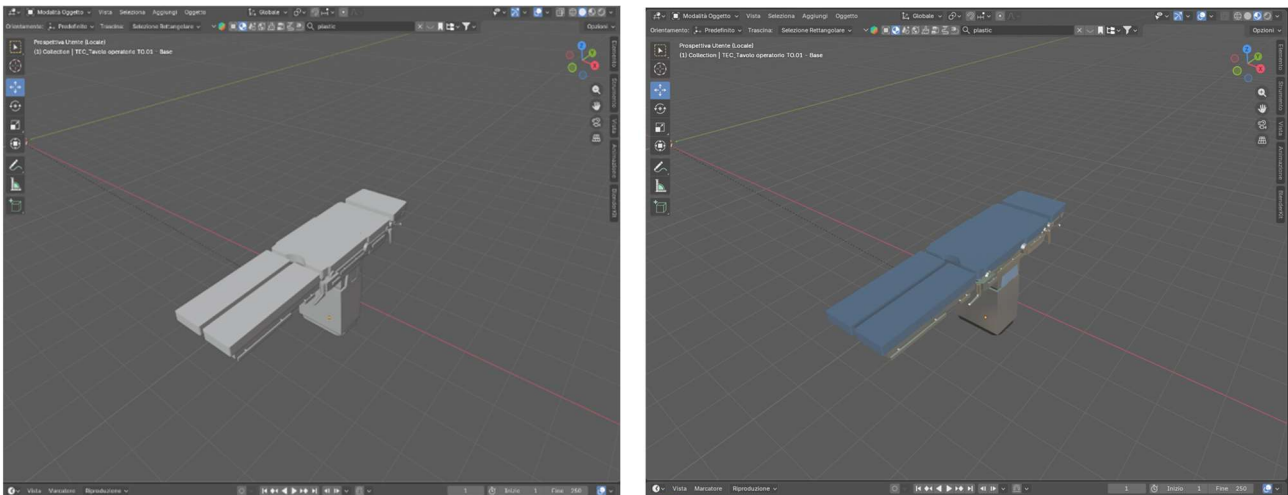


Figura 54 – Modifica dei materiali e delle proprietà di un modello di tavolo operatorio in Blender

Oltre agli elementi esportati dai modelli preesistenti, sono state introdotte nel flusso di lavoro alcune risorse FBX esterne, come pazienti, strumenti chirurgici e arredi ospedalieri non modellati nei file di Revit. Nel caso del paziente, per esempio, il modello raffigura un uomo adulto che indossa un camice ospedaliero ed è stato utilizzato per valutare l'occupazione spaziale e l'accessibilità all'interno degli ambienti simulati.

Il modello del paziente è stato importato in Blender in formato FBX e duplicato più volte per creare tre configurazioni distinte corrispondenti ai diversi scenari richiesti nello studio. Nello specifico, il paziente è stato posizionato in tre pose: seduto su una sedia a rotelle per gli spostamenti all'interno del reparto, sdraiato su una barella per simulare il trasporto dall'area di preparazione alla sala operatoria e sempre in posizione orizzontale con le braccia aperte per rappresentare l'occupazione spaziale durante gli interventi chirurgici. Queste trasformazioni sono state ottenute utilizzando il sistema di armature di Blender. Un'armatura è una struttura gerarchica di ossa virtuali che funge da scheletro per la deformazione di una mesh. Ogni osso controlla una porzione della geometria attraverso il weight painting, consentendo il movimento articolato di arti e segmenti corporei. Manipolando le ossa dell'armatura in modalità posa, è stato possibile regolare la posizione del modello del paziente preservando le proporzioni anatomiche e l'articolazione realistica delle articolazioni.

Completate tutte le modifiche, è stata eseguita una fase di pulizia e ottimizzazione della mesh. Questa fase ha incluso la verifica del corretto orientamento delle normali alle superfici, assicurandosi che le direzioni delle facce fossero coerenti e visibili al motore di rendering. Un corretto orientamento delle normali è essenziale per un'adeguata

ombreggiatura e illuminazione negli ambienti in tempo reale. Ulteriori operazioni hanno incluso la rimozione di geometrie ridondanti, l'unione di vertici non necessari e la verifica della coerenza ed efficienza della topologia della mesh per il rendering in tempo reale.

Una volta preparate le risorse 3D ed esportate da Blender in formato FBX, la fase successiva del flusso di lavoro è stata la creazione delle scene interattive in Unity, un motore di sviluppo in tempo reale ampiamente utilizzato per applicazioni interattive e simulazioni immersive. L'architettura di questa piattaforma si basa su un paradigma scena-oggetto: ogni ambiente virtuale è organizzato come una scena contenente più GameObject, che rappresentano gli elementi presenti nel mondo virtuale. Ognuno di essi può includere una serie di componenti che ne definiscono le proprietà e il comportamento, come la geometria (filtri mesh), le proprietà di rendering (materiali e shader), le interazioni fisiche (collider e corpi rigidi) e la logica di interazione. Una delle caratteristiche principali di Unity è la sua impostazione modulare, che consente agli sviluppatori di estendere le funzionalità del motore tramite pacchetti e risorse. I pacchetti sono raccolte di moduli software che integrano sistemi o strumenti aggiuntivi nel motore. Possono essere installati tramite Unity Package Manager e in genere includono librerie, script e strumenti di editor progettati per implementare funzionalità specifiche come sistemi fisici, pipeline di rendering o framework di interazione estesi. Le risorse, invece, sono le entità utilizzate per costruire l'ambiente virtuale. Possono includere modelli 3D, texture, materiali, file audio, animazioni, oggetti prefabbricati (prefab) e script che definiscono comportamenti interattivi.

Il comportamento e la logica degli oggetti in questa piattaforma sono controllati principalmente tramite script sviluppati in C#, un linguaggio di programmazione orientato agli oggetti sviluppato da Microsoft. C# è ampiamente utilizzato nello sviluppo di software grazie al suo solido sistema di tipizzazione, alla sintassi strutturata e al supporto per la programmazione modulare. In Unity questi script hanno lo scopo di definire il comportamento e l'interazione degli oggetti presenti nella scena. Essi sono associati ai GameObject come componenti, consentendo loro di controllare proprietà come il movimento, le risposte di interazione, le animazioni e la gestione dell'input dell'utente. Come primo approccio all'interfaccia di Unity è stato necessario creare un progetto e configurarlo per supportare l'interazione con la realtà virtuale immersiva. Ciò ha comportato l'abilitazione delle impostazioni appropriate per l'ambiente XR e l'installazione dei pacchetti necessari tramite Unity Package Manager. In particolare, il flusso di lavoro si è basato sull'XR Interaction Toolkit, che ha fornito un framework di base

per l'implementazione di meccanismi di interazione, gestione degli input del controller, sistemi di locomozione e manipolazione di oggetti nelle applicazioni VR.

Dopo aver installato i pacchetti necessari e abilitato il supporto XR, la configurazione iniziale dell'ambiente virtuale ha incluso la creazione di un VR Player, un oggetto composito che rappresenta l'utente all'interno della scena virtuale. Il VR Player funge da sistema di interazione centrale attraverso il quale l'utente percepisce e interagisce con l'ambiente. Contiene diversi componenti responsabili della gestione del tracciamento del visore e dei controller, dell'elaborazione dei comandi di input e della traduzione dei movimenti dell'utente in azioni all'interno del mondo virtuale. All'interno della gerarchia del VR Player, sono stati assegnati e configurati modelli che rappresentano le mani dell'utente. Questi ultimi sono stati creati e configurati per essere collegati ai controller VR e muoversi in base ai dati di tracciamento in tempo reale forniti dai sensori del visore. Grazie al sistema di interazione fornito dall'XR Interaction Toolkit, le mani sono in grado di eseguire operazioni come puntare, selezionare e afferrare oggetti all'interno della scena. Sono stati quindi configurati componenti di interazione specifici per consentire la presa, la manipolazione e il rilascio degli oggetti, consentendo un'interazione fisica realistica con elementi architettonici, arredi e apparecchiature mediche all'interno degli ambienti ospedalieri simulati. Un altro componente chiave è la telecamera principale (Main Camera), che gestisce la prospettiva visiva dell'utente. Essa corrisponde alla rappresentazione virtuale del visore e aggiorna costantemente la sua posizione e il suo orientamento in base ai movimenti reali della testa dell'utente. Particolare attenzione è stata dedicata alla configurazione dell'offset verticale e dell'allineamento spaziale della telecamera in modo che il punto di vista virtuale corrispondesse accuratamente all'altezza dell'utente e alla sua distanza dal pavimento. Questa calibrazione ha garantito che la scala percepita dell'ambiente e la relazione tra l'utente e gli oggetti circostanti rimanessero realistiche durante l'esperienza immersiva.

Sono stati regolati parametri aggiuntivi per perfezionare il sistema di locomozione e il comportamento di rotazione della testa, inclusa la velocità e la fluidità del movimento. Queste impostazioni sono essenziali per mantenere comfort e realismo nelle esperienze VR, poiché parametri di movimento inappropriati possono causare disorientamento spaziale o ridurre l'immersione. Bilanciando attentamente velocità di movimento, reattività rotazionale e parametri di smoothing, il sistema è stato configurato per consentire l'esplorazione naturale degli ambienti ospedalieri simulati.

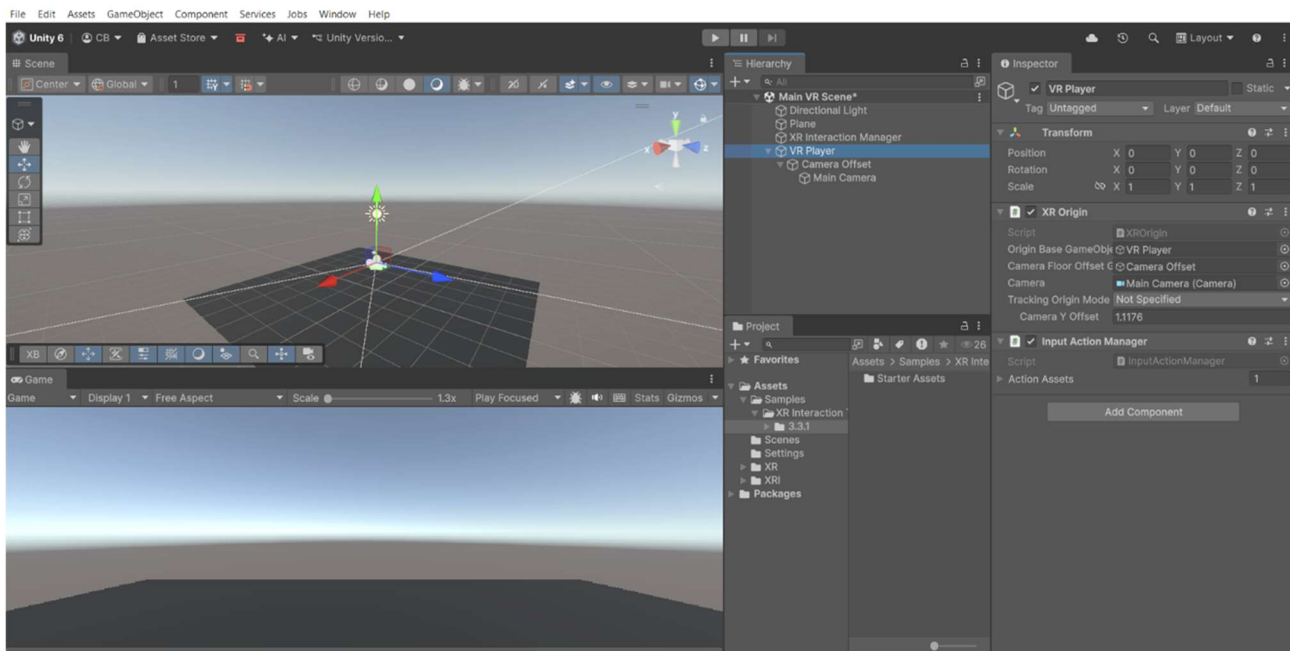


Figura 55 – Definizione del VR Player sull'interfaccia di Unity

Infine, i parametri globali della scena relativi a rendering, illuminazione e qualità visiva sono stati configurati per garantire prestazioni ottimali e nitidezza visiva. Le impostazioni di rendering sono state regolate per raggiungere un equilibrio appropriato tra fedeltà grafica e prestazioni in tempo reale, aspetto particolarmente importante nelle applicazioni VR in cui sono necessari frame rate elevati per mantenere l'immersione ed evitare disagi dovuti al movimento. Anche le impostazioni di illuminazione sono state calibrate per riprodurre accuratamente le condizioni degli spazi sanitari e ospedalieri, contribuendo al realismo dell'ambiente interattivo.

Attraverso questa fase di configurazione iniziale, il progetto Unity è stato preparato per ospitare i modelli architettonici e i componenti interattivi. Infatti, il passaggio successivo è stato quello dell'importazione dei vari oggetti e asset necessari per la realizzazione dell'ambientazione del blocco operatorio e del reparto di degenza. Gli elementi sono stati importati in formato FBX, inserendoli nella cartella Assets del progetto. Successivamente il motore genera automaticamente un GameObject corrispondente che può essere inserito nella gerarchia della scena. Durante il processo di importazione, Unity legge la geometria contenuta nel file FBX e ricostruisce le strutture mesh all'interno della scena. Ogni mesh rappresenta un insieme di vertici, spigoli e facce poligonali che definiscono la forma dell'oggetto. Le relazioni gerarchiche definite in Blender, come le strutture padre-figlio utilizzate per elementi articolati come porte o componenti di equipaggiamento, vengono mantenute durante l'importazione, garantendo che gli

oggetti mantengano l'organizzazione funzionale necessaria per l'interazione all'interno dell'ambiente virtuale. Una volta importati, gli asset possono essere posizionati, ridimensionati e ruotati all'interno della scena.

Dopo aver posizionato i modelli all'interno dell'ambiente, è stato definito l'aspetto visivo degli elementi attraverso l'assegnazione dei materiali. In Unity, i materiali controllano il modo in cui le superfici interagiscono con la luce e determinano le proprietà visive degli oggetti. Per questo progetto, i materiali sono stati definiti utilizzando un flusso di lavoro PBR (Physically Based Rendering), una metodologia di rendering progettata per simulare il comportamento fisico della luce che interagisce con materiali reali. Tale metodo si basa su modelli matematici che descrivono come la radiazione luminosa viene riflessa, assorbita o diffusa da una superficie. Invece di basarsi su approssimazioni di carattere artistico, il PBR utilizza parametri accurati dal punto di vista fisico, producendo risultati visivi coerenti in diverse condizioni ambientali. Un approccio di questo tipo risulta particolarmente adatto per interfacce di rendering in tempo reale come le applicazioni VR, garantendo realismo visivo e allo stesso tempo mantenendo l'efficienza computazionale.

In un flusso di lavoro PBR, l'aspetto visivo di un materiale è definito attraverso un set di mappe texture che ne descrivono le proprietà fisiche della superficie. La "mappa albedo" specifica il colore di base del materiale, mentre quella "normale" simula i dettagli superficiali più fini senza aumentare la complessità geometrica. Le mappe "metallic" e "roughness" (o "smoothness") determinano il grado di riflessione della superficie e la diffusione della luce, distinguendo tra materiali metallici e non. Mappe aggiuntive, come "ambient occlusion", possono migliorare l'ombreggiatura nelle aree incassate, migliorando la percezione della profondità. Queste texture vengono combinate all'interno di un materiale tramite shader, piccoli programmi che controllano il rendering delle superfici. Il progetto ha utilizzato lo shader fisico standard fornito dalla pipeline di rendering di Unity, sostituendo i materiali temporanei assegnati durante la fase di preparazione in Blender. Questo passaggio ha permesso di assegnare proprietà visive realistiche a superfici architettoniche, arredi, apparecchiature mediche e sistemi tecnici, migliorando significativamente la leggibilità e il realismo complessivi degli ambienti immersivi.

Sono state sviluppate due scene immersive separate, corrispondenti agli ambienti ospedalieri selezionati per lo studio. Ogni scena è stata costruita progressivamente, a partire dai modelli BIM precedentemente esportati da Autodesk Revit e preparati in

Blender. I modelli sono stati organizzati secondo la struttura disciplinare originale, consentendo la gestione indipendente dei componenti architettonici, strutturali e MEP durante il processo di assemblaggio della scena.

Come anticipato, pareti, pavimenti, solai, controsoffitti, colonne e altri componenti sono stati posizionati all'interno della scena e rifiniti con l'assegnazione delle texture e dei materiali definitivi. In questa fase, è stata anche rivista la gerarchia degli oggetti per garantire che ciascun elemento si comportasse come un'entità indipendente all'interno della struttura dell'ambiente digitale. Una volta definito l'ambiente architettonico di base, sono stati introdotti gli impianti dell'edificio. Questi sono stati suddivisi in impianti HVAC (aeraulici), impianti sanitari, componenti elettrici e attrezzature ospedaliere specializzate. Solo i componenti visibili all'utente sono stati importati nel programma. Installazioni nascoste, come condotti, tubi o canaline portacavi situati all'interno di vani di servizio o sopra controsoffitti, sono state intenzionalmente escluse. Poiché lo scopo dell'ambiente virtuale è la visualizzazione spaziale immersiva piuttosto che il coordinamento tecnico, l'attenzione è rimasta sui componenti percepibili dall'utente durante la navigazione. Le scene sono state poi arricchite con arredi, porte e finestre. Questi elementi contribuiscono in modo significativo alla percezione spaziale e alla leggibilità funzionale all'interno degli ambienti sanitari. La loro inclusione ha contribuito a ricreare spazi operatori e per i pazienti realistici, mantenendo al contempo una chiara relazione tra architettura, attrezzature e aree di circolazione.

Per ogni oggetto aggiunto, è stato assegnato un componente collider appropriato. In Unity, un collider definisce i confini fisici di un oggetto ai fini del rilevamento delle collisioni e dell'interazione. A differenza della mesh visiva utilizzata per il rendering, il collider rappresenta un volume geometrico semplificato che il motore fisico utilizza per determinare il modo in cui gli oggetti interagiscono nello spazio. Sono stati utilizzati diversi tipi di collider a seconda della geometria e del comportamento previsto per l'elemento. Agli oggetti semplici sono stati assegnati collisori a scatola ("box collider") o a sfera ("sphere collider"), mentre le forme più complesse hanno richiesto "mesh collider" che seguono fedelmente la geometria dell'oggetto. Attraverso questi componenti, l'ambiente virtuale acquisisce consistenza fisica: gli oggetti non possono intersecarsi o attraversarsi a vicenda, le superfici si comportano come barriere e gli utenti non possono muoversi attraverso muri o pavimenti. Inoltre, grazie alla presenza dei collisori è stata possibile l'assegnazione di proprietà fisiche aggiuntive tramite il sistema fisico della piattaforma. Per alcuni elementi, la gravità e i comportamenti dei corpi rigidi sono stati

configurati in modo che gli oggetti reagissero naturalmente quando manipolati. Per altri, sono stati aggiunti componenti di interazione per consentire all'utente di afferrarli o spostarli utilizzando i controller VR.

Sebbene i modelli Revit fossero sufficientemente dettagliati per la produzione dei disegni richiesti nella fase di progettazione di fattibilità tecnico-economica, non includevano tutti gli elementi necessari per trasmettere un ambiente ospedaliero completamente realistico in realtà virtuale. I modelli BIM si concentrano in genere sul coordinamento della progettazione piuttosto che sulla rappresentazione di oggetti su piccola scala che contribuiscono alla percezione spaziale quotidiana. Per ovviare a questa limitazione, sono stati integrati asset esterni aggiuntivi per completare l'ambientazione delle scene. Questi includevano elementi di arredo supplementari, personaggi dei pazienti quando necessario per la valutazione spaziale e rappresentazioni più dettagliate di alcuni dispositivi medici. Sono state inoltre introdotte entità di scena supplementari per rendere gli ambienti più dinamici e abitati. Nell'ambiente del blocco operatorio, strumenti chirurgici e attrezzature procedurali sono stati posizionati all'interno dell'area di lavoro. Invece nel reparto delle degenze, oggetti di uso quotidiano tra cui contenitori per farmaci, bottiglie d'acqua ed elementi decorativi come i fiori sono stati aggiunti per trasmettere l'atmosfera di una stanza di ospedale vissuta.

Tutti gli asset importati esternamente sono stati elaborati allo stesso modo degli oggetti derivati dal BIM. Sono stati assegnati opportuni collider per definirne la presenza fisica all'interno della scena e, se necessaria l'interazione, sono stati configurati componenti aggiuntivi per consentirne la manipolazione da parte dell'utente. Attraverso questo processo di assemblaggio strutturato, gli ambienti virtuali si sono gradualmente evoluti da un modello architettonico semplificato a una rappresentazione coerente e interattiva degli spazi ospedalieri, adatta all'esplorazione immersiva.

Dopo aver posizionato gli elementi architettonici, i sistemi e gli oggetti nelle scene, la fase successiva ha previsto la configurazione dei comportamenti interattivi che consentono agli utenti di esplorare e manipolare l'ambiente virtuale. L'obiettivo di questo studio non si limita alla rappresentazione visiva; l'ambiente immersivo è stato progettato come strumento per la valutazione spaziale e la progettazione partecipata. In particolare, nelle strutture sanitarie, la validazione delle soluzioni progettuali dipende fortemente dall'esperienza e dal feedback operativo del personale medico. Chirurghi, infermieri, facility manager e altri stakeholder devono essere in grado di valutare se gli spazi progettati supportano efficacemente i flussi di lavoro clinici. Per questo motivo, le scene

virtuali sono state configurate in modo che diverse categorie di utenti (professionisti della progettazione, clienti, personale sanitario e persino potenziali pazienti) potessero navigare nel modello, interagire con gli oggetti e sperimentare direttamente l'organizzazione spaziale degli ambienti. L'interazione è stata implementata utilizzando i sistemi forniti dall'XR Interaction Toolkit all'interno di Unity. Componenti specifici sono stati associati agli oggetti selezionati per consentire la manipolazione da parte dell'utente tramite i controller VR.

Tra questi componenti, uno dei più utilizzati è stato "XR Grab Interactable", che consente di afferrare, spostare e rilasciare oggetti utilizzando i controller manuali tracciati. Quando questo componente viene assegnato a un oggetto, il sistema rileva quando la mano virtuale dell'utente si avvicina al collider di quell'elemento e abilita l'interazione in base a parametri predefiniti. Ciò ha permesso di simulare la manipolazione realistica di apparecchiature e oggetti all'interno degli ambienti ospedalieri virtuali.

Nella scena della sala operatoria, numerosi elementi sono stati configurati come oggetti interattivi. Gli strumenti chirurgici, ad esempio, sono stati posizionati su vassoi e superfici di preparazione e resi completamente afferrabili dall'utente. L'ambiente include anche il tavolo operatorio, il modello del paziente, i carrelli mobili, le lampade chirurgiche, le macchine per anestesia e altri dispositivi tipicamente presenti in una sala operatoria. Interagendo con questi elementi, un medico che utilizza un visore VR può valutare la fruibilità pratica dello spazio: la distanza tra le apparecchiature, l'accessibilità degli strumenti durante le procedure, il posizionamento dei dispositivi di illuminazione e la libertà di movimento complessiva attorno al tavolo operatorio. Vivere l'ambiente in scala reale consente di identificare vincoli spaziali o inefficienze che potrebbero non essere evidenti durante l'analisi di disegni o modelli 3D convenzionali. Questa valutazione immersiva supporta la raccolta di feedback mirati da parte degli operatori sanitari. Le loro osservazioni possono quindi essere utilizzate per perfezionare la disposizione delle apparecchiature, adattare gli spazi di circolazione o riposizionare gli elementi funzionali all'interno della stanza. In questo modo, l'ambiente virtuale diventa una piattaforma collaborativa che collega lo sviluppo del progetto con le esigenze operative del personale medico che utilizzerà la struttura.

Un approccio simile è stato applicato alla scena del reparto di degenza, sebbene l'attenzione si sia spostata dall'efficienza operativa al comfort del paziente e alla percezione spaziale. La stanza virtuale è stata dotata degli elementi tipici di un reparto ospedaliero, tra cui il letto, i comodini, le sedute, i mobili contenitori, i dispositivi medici e

gli oggetti decorativi. In questo contesto, l'esperienza immersiva consente agli utenti, in particolare ai potenziali pazienti o al personale sanitario, di valutare il comfort percepito dell'ambiente, l'accessibilità degli arredi e l'atmosfera generale della stanza. Il feedback raccolto da queste esperienze può guidare miglioramenti volti a supportare il benessere del paziente e a facilitarne la guarigione.

Per migliorare ulteriormente il realismo, a diversi elementi è stata assegnata una logica comportamentale specifica. Le porte, ad esempio, sono state programmate in base ai loro meccanismi di funzionamento reali. Le porte a battente possono essere aperte manualmente interagendo con la maniglia, con il loro asse di rotazione correttamente allineato con la posizione della cerniera definita durante la fase di modellazione. Ciò permette agli utenti di valutare se l'orientamento delle porte e i percorsi di circolazione sono coerenti con l'organizzazione funzionale degli spazi. Le porte scorrevoli, comunemente utilizzate all'ingresso delle sale operatorie o nelle aree di preparazione dei pazienti, sono state invece configurate come sistemi automatici. È stato implementato un sensore di movimento in modo che le porte si aprano all'avvicinarsi dell'utente, replicando il comportamento tipico delle strutture sanitarie.

Attraverso l'integrazione di questi componenti interattivi, le scene si sono evolute da modelli architettonici statici ad ambienti reattivi in grado di supportare la valutazione immersiva del design. La possibilità di manipolare oggetti, sperimentare relazioni spaziali a grandezza naturale e osservare il comportamento degli elementi architettonici offre alle parti interessate una comprensione diretta del funzionamento pratico degli spazi progettati. Questo approccio rafforza il ciclo di feedback tra lo sviluppo del progetto e il prodotto finale.

Oltre all'esplorazione spaziale e all'interazione con gli oggetti, gli ambienti virtuali sono stati dotati di un'applicazione dedicata che permette agli utenti di modificare attivamente la configurazione degli spazi. Questa funzionalità è stata implementata tramite il sistema di interfaccia utente (UI) disponibile in Unity, in particolare utilizzando pannelli di interazione basati su Canvas.

Il sistema di interfaccia utente del programma è costruito attorno al cosiddetto Canvas, contenitore che gestisce il rendering e l'organizzazione spaziale di elementi interattivi come pulsanti, menu, cursori e campi di testo. Esso funge da livello bidimensionale posizionato nello spazio dello schermo o direttamente all'interno dell'ambiente tridimensionale. In questo progetto, l'interfaccia è stata implementata come "world-

space", il che significa che i pannelli esistono come oggetti all'interno della scena virtuale e possono essere avvicinati e interagiti utilizzando i controller VR. Questa configurazione consente al sistema di comportarsi come un pannello di controllo fisico all'interno dell'ambiente immersivo piuttosto che come una sovrapposizione esterna.

I componenti dell'interfaccia utente sviluppati in questo progetto includono menu di selezione, cursori e pulsanti, ciascuno collegato a specifici script di controllo sviluppati in C#. Attraverso questa applicazione, gli utenti possono accedere a una modalità di modifica dedicata che consente la manipolazione diretta della configurazione architettonica e della disposizione interna degli spazi. In questa modalità, sono forniti controlli sia per gli elementi strutturali che per le attrezzature ospedaliere. Gli utenti possono interagire con pareti, soffitti, pavimenti e apparecchi di illuminazione, nonché con arredi e attrezzature mediche come macchinari, carrelli, aste portaflebo, sedie, letti ospedalieri e altri elementi mobili presenti nelle scene. Una volta selezionato un oggetto tramite l'interfaccia, l'utente può modificarne la configurazione spaziale traslandolo o ruotandolo lungo gli assi globali della scena (X, Y, Z) o rispetto agli assi locali dell'oggetto selezionato. Traslazione e rotazione sono controllate tramite cursori che regolano i parametri di trasformazione con valori incrementali precisi, consentendo all'utente di sperimentare diverse disposizioni spaziali in modo controllato.

Questo sistema trasforma l'ambiente immersivo da un semplice strumento di visualizzazione in una piattaforma di progettazione interattiva. Il processo partecipativo si estende quindi oltre la raccolta di feedback qualitativi da parte di utenti come medici, infermieri o pazienti. Viene invece data loro l'opportunità di riorganizzare direttamente la disposizione dell'ambiente in base alle proprie preferenze operative o alle esigenze di comfort. Un chirurgo, ad esempio, può riposizionare le apparecchiature mediche attorno al tavolo operatorio per migliorare l'efficienza del flusso di lavoro, mentre un paziente o un infermiere potrebbero modificare la disposizione degli arredi all'interno di una stanza di degenza per migliorarne l'accessibilità e la vivibilità. Una volta che gli utenti hanno configurato l'ambiente in base alle proprie esigenze, le modifiche proposte possono essere riviste dal team di progettazione. Architetti e ingegneri analizzano le modifiche e le reinterpretono nel rispetto dei vincoli imposti dalle normative tecniche, dai requisiti funzionali e dagli standard di progettazione sanitaria. In questo modo, la piattaforma immersiva supporta un flusso di lavoro collaborativo in cui l'input dell'utente finale informa il processo di progettazione, mentre le competenze professionali garantiscono la conformità al quadro normativo e tecnico che regola l'edilizia ospedaliera.

Nel complesso, il processo descritto delinea l'intera pipeline metodologica utilizzata per trasformare i modelli BIM in ambienti virtuali interattivi. Partendo dalla preparazione e dall'ottimizzazione del modello, passando per l'assemblaggio delle scene e l'implementazione delle interazioni, il flusso di lavoro arriva allo sviluppo di spazi ospedalieri immersivi e modificabili che supportano la valutazione partecipativa della progettazione.

La struttura e la funzionalità dell'interfaccia, insieme ai risultati ottenuti applicando questo flusso di lavoro al caso di studio selezionato, vengono analizzati in dettaglio nel Capitolo 3, dove sono discussi l'efficacia dell'approccio immersivo e l'analisi eseguita durante la sperimentazione.



Figura 56 – Rendering di parte delle scene immersive e interattive realizzate con Unity (in alto: sala operatoria di emergenza, in basso: camera di degenza con due posti letto)

3. Applicazione BIM-VR al caso studio

Dopo aver delineato le caratteristiche principali del caso studio, la sua fase di sviluppo progettuale e il più ampio contesto tecnico e organizzativo in cui si inserisce, risulta ora utile cambiare la prospettiva dell'analisi. Il progetto descritto nel capitolo precedente non costituisce semplicemente l'oggetto di indagine, ma diventa piuttosto il framework sperimentale attraverso il quale l'integrazione tra metodologia BIM e strumenti di realtà virtuale può essere testata e valutata operativamente.

In questo senso, il caso studio si configura come ambiente di ricerca applicata, consentendo l'implementazione e la validazione di un flusso di lavoro BIM-VR strutturato e funzionale. L'attenzione si sposta quindi da un esame descrittivo del progetto alla sua trasformazione in un vero e proprio scenario sperimentale, dove il modello digitale non è più solo un artefatto rappresentativo, ma diventa uno strumento dinamico di coordinamento, verifica e simulazione spaziale.

I capitoli seguenti si basano sulla descrizione dello sviluppo e dell'organizzazione dei modelli disciplinari e delle strategie adottate per garantire lo scambio di dati tra le varie piattaforme utilizzate. Viene, infatti, esaminato il processo di clash detection condotto all'interno dell'ambiente virtuale, evidenziando come la visualizzazione immersiva abbia contribuito all'identificazione e alla gestione dei conflitti tra componenti architettonici, strutturali e impiantistici. Infine, si passa alla presentazione delle scene virtuali interattive come ulteriore fase del processo di integrazione tra BIM e interfacce immersive, sottolineando i vantaggi offerti da questo tipo di approccio nella presentazione del progetto.

Attraverso questa sequenza strutturata, la ricerca analizza l'integrazione BIM-VR non soltanto come un potenziamento delle capacità di visualizzazione del modello digitale, ma come un flusso di lavoro ingegneristico coordinato che coinvolge la strutturazione dei dati, la gestione dell'interoperabilità, il monitoraggio dei problemi, cicli di correzione iterativi e la convalida immersiva. Le sezioni che seguono descrivono in dettaglio ogni fase di questo procedimento, approfondendo le scelte operative adottate, le modalità di scambio dei formati informativi e le strategie di ottimizzazione implementate. Viene, infatti, illustrato come l'integrazione tra strumenti di modellazione BIM, formati di dati aperti e tecnologie immersive possa essere resa concretamente operativa in un contesto di progettazione reale.

3.1. Clash Detection

3.1.1. Metodologia e risultati dell'analisi delle interferenze

Seguendo il flusso di lavoro descritto nel Capitolo 2, i modelli BIM sono stati integrati nell'ambiente immersivo e analizzati tramite la piattaforma VRex. In questa fase, l'attenzione si è spostata dalla preparazione del modello e dall'implementazione tecnica alla valutazione qualitativa e spaziale del progetto, con particolare attenzione all'identificazione di potenziali interferenze tra componenti architettonici, strutturali e impiantistici.

Mentre le procedure convenzionali di rilevamento delle interferenze si basano tipicamente su controlli geometrici automatizzati tra gli elementi del modello, l'approccio adottato in questo studio sperimentale si basa su una valutazione spaziale immersiva condotta a grandezza naturale. L'ambiente virtuale consente all'utente di muoversi liberamente all'interno degli spazi e di osservare le relazioni tra gli elementi da molteplici punti di vista, inclusi quelli corrispondenti alle reali posizioni operative all'interno dell'ambiente ospedaliero. Questa prospettiva consente l'individuazione di conflitti spaziali che potrebbero non emergere necessariamente attraverso controlli puramente algoritmici, soprattutto in situazioni in cui il problema riguarda l'usabilità, l'accessibilità o la logica operativa dell'ambiente sanitario.

In questa fase, l'attenzione dell'indagine si è concentrata sull'identificazione e l'analisi delle interferenze tecniche tra i diversi modelli disciplinari, con particolare attenzione al coordinamento tra componenti architettonici, strutturali e impiantistici. Questa analisi rappresenta un passaggio fondamentale nella verifica di modelli BIM coordinati, in quanto consente di identificare le incongruenze che possono derivare dall'integrazione di elementi sviluppati all'interno di diverse discipline progettuali. Nella ricerca, l'ambiente immersivo fornito da VRex è stato utilizzato come strumento di supporto all'ispezione visiva del modello, consentendo un'osservazione diretta delle relazioni spaziali tra i componenti edilizi. Durante la ricerca delle criticità di progettazione e modellazione è stata rivolta particolare attenzione alle aree caratterizzate da un'elevata densità di elementi, come controsoffitti, cavedi verticali e zone di servizio, dove la probabilità di interferenza tra i sistemi è tipicamente più elevata. La visualizzazione immersiva ha consentito l'ispezione simultanea di più livelli del modello, consentendo di valutare la

configurazione spaziale degli elementi e di verificare la presenza di potenziali interferenze direttamente all'interno dell'ambiente tridimensionale.

Durante il processo di ispezione, sono state identificate diverse tipologie di interferenza, tra cui quelle geometriche dirette tra componenti edilizi, sovrapposizioni tra elementi appartenenti a discipline diverse e incongruenze relative al posizionamento o alla modellazione di oggetti specifici all'interno dell'ambiente BIM. In alcuni casi, le problematiche rilevate erano attribuibili a problemi di coordinamento tra i modelli architettonici, strutturali e MEP, mentre in altri derivavano da imprecisioni nel processo di modellazione, come dimensioni errate degli elementi, componenti disallineati o geometrie definite in modo errato.

All'interno di VRex, l'interfaccia utente consente il caricamento simultaneo di più modelli IFC, ciascuno corrispondente a una diversa disciplina di progettazione. Una volta importati, questi modelli possono essere gestiti individualmente tramite i controlli di visualizzazione forniti dal software, che consentono l'attivazione, la disattivazione o l'isolamento di specifici file o categorie di elementi. Questa funzionalità è particolarmente utile durante l'esecuzione di verifiche di coordinamento, in quanto consente all'utente di visualizzare selettivamente i componenti rilevanti del modello e di focalizzare l'analisi su specifiche interazioni tra i sistemi.

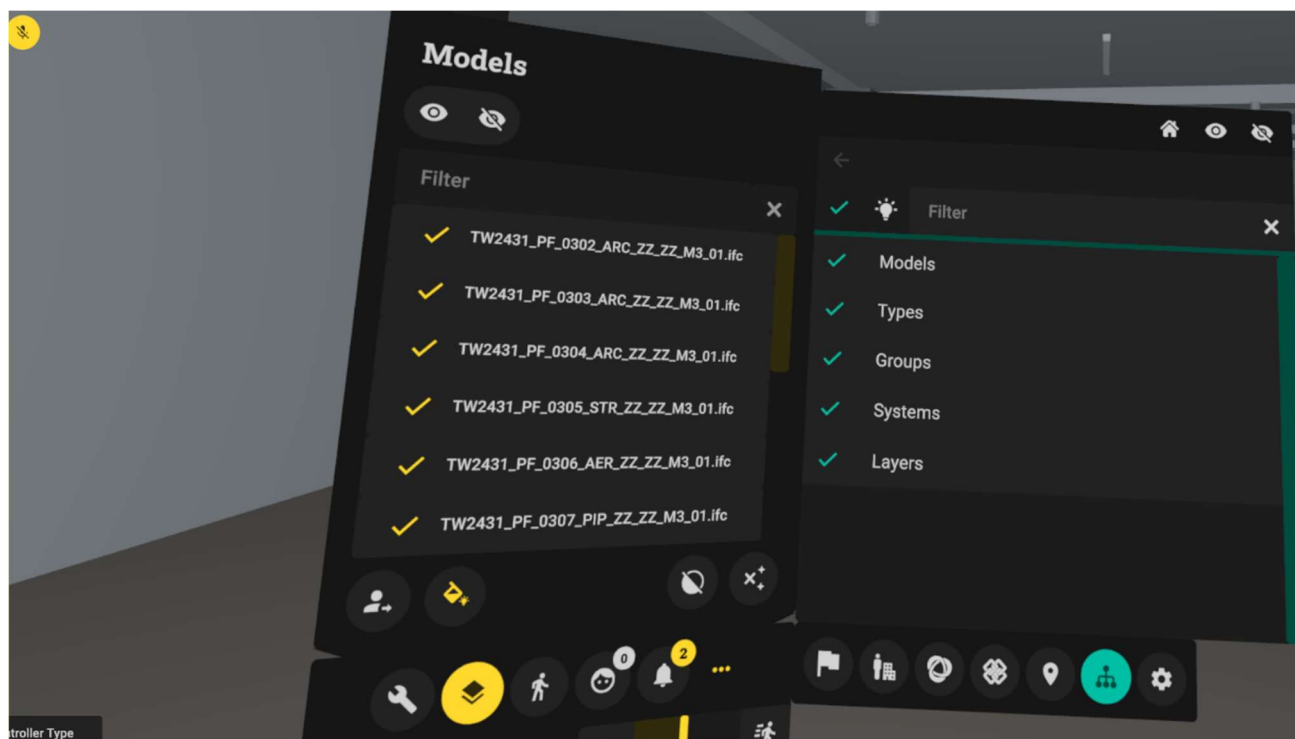


Figura 57 – Visualizzazione dei modelli disciplinari collegati in VRex

Il processo di rilevamento delle interferenze è stato quindi eseguito filtrando progressivamente i modelli visibili ed esaminando le relazioni spaziali tra le discipline. Dal punto di vista operativo, la procedura ha richiesto la disattivazione temporanea di alcuni modelli, mantenendone attivi altri, al fine di osservare chiaramente potenziali interferenze tra i componenti in esame. Questo approccio ha permesso di isolare i contributi di ciascuna disciplina ed evitare confusione visiva che potesse oscurare i conflitti rilevanti. L'analisi è stata strutturata in una sequenza di fasi di verifica. Inizialmente, ogni disciplina è stata analizzata singolarmente per identificare incongruenze interne allo stesso modello, come componenti sovrapposti, elementi duplicati o imprecisioni nella modellazione. Una volta completate queste verifiche preliminari, l'attenzione si è spostata sul coordinamento tra le diverse discipline. I modelli sono stati quindi analizzati a coppie, partendo dall'interazione tra elementi architettonici e strutturali, per poi passare alle relazioni tra componenti architettonici e impianti e, infine, al coordinamento tra elementi strutturali e sistemi MEP.

Per ogni fase, è stata condotta un'ispezione approfondita del modello nei due ambienti selezionati per l'indagine di dettaglio: blocco operatorio situato al primo piano (P1) e il reparto di degenza al quinto livello (P5). Questi spazi sono stati esplorati sistematicamente, esaminando soffitti, pareti, aree di servizio e zone caratterizzate da un'elevata concentrazione di elementi tecnici, dove la probabilità di interferenza tra i sistemi è tipicamente maggiore.

Ogni volta che è stata identificata una collisione o una potenziale interferenza, il problema è stato documentato creando una "issue" BCF. Questo processo ha comportato l'acquisizione di uno screenshot del conflitto rilevato direttamente dall'ambiente immersivo, garantendo che il contesto spaziale e gli elementi coinvolti fossero chiaramente visibili. I campi BCF corrispondenti sono stati quindi popolati con le informazioni rilevanti al fine di tracciare accuratamente il problema all'interno del processo di coordinamento. Ciascun record è stato associato ad un titolo specifico, includendo riferimenti ai modelli o alle discipline coinvolte per facilitarne l'identificazione. Inoltre, una breve descrizione del conflitto è stata fornita nella sezione commenti, insieme a un'interpretazione preliminare del problema e, quando possibile, suggerimenti per potenziali modifiche progettuali o di modellazione volte a risolvere l'incoerenza rilevata. Attraverso questo processo, ogni criticità individuata è stata registrata in un formato strutturato che consente di comunicare, esaminare e risolvere facilmente il problema all'interno del flusso di lavoro e di coordinamento BIM.



Figura 58 – Compilazione del titolo di una “issue” del file BCF nell’ambiente immersivo di VRex

La navigazione all'interno dell'ambiente virtuale avviene direttamente tramite i controller del visore, che permettono all'utente di muoversi liberamente nel modello e ispezionare l'edificio a grandezza naturale. Il movimento è intuitivo: traslazioni, rotazioni e cambi di punto di vista possono essere eseguiti mantenendo una percezione continua dello spazio circostante. Durante l'esplorazione, un pannello di controllo interattivo rimane sempre presente nel campo visivo. Questa interfaccia può essere espansa quando sono necessari strumenti aggiuntivi e ridotta nuovamente per evitare di ostruire la scena, consentendo di alternare rapidamente tra osservazione e analisi durante il processo di ispezione.

La rappresentazione non è pensata per una visualizzazione generica del modello, ma persegue uno scopo preciso: identificare, esaminare e, in ultima analisi, risolvere le interferenze tra i componenti dell'edificio. Muovendosi all'interno dell'ambiente, l'utente può avvicinarsi ad aree critiche, osservare le relazioni spaziali tra gli elementi da diversi punti di vista e verificare se gli oggetti si intersecano o occupano volumi incompatibili. La possibilità di cambiare posizione istantaneamente, guardando sopra i soffitti, dietro le pareti o all'interno di zone di servizio dense, rende l'indagine di potenziali interferenze significativamente più diretta rispetto alla navigazione convenzionale del modello basata su desktop. Una caratteristica importante dell'ambiente virtuale è che il movimento non è vincolato da limitazioni fisiche. Gli utenti possono passare direttamente attraverso gli oggetti, sollevarsi dal pavimento o posizionarsi in qualsiasi

punto dello spazio senza essere sottoposti alla gravità o ai confini fisici dell'architettura. Sebbene questa condizione possa inizialmente sembrare un po' disorientante, si trasforma rapidamente in un potente strumento analitico. La possibilità di muoversi liberamente attraverso il modello consente di esaminare in dettaglio aree normalmente inaccessibili nella realtà, o difficili da ispezionare tramite la navigazione standard del modello. Questa libertà di spostamento consente di indagare parti dell'edificio che solitamente rimangono nascoste una volta completata la costruzione. Intercapedini, vani tecnici, spazi sopra i controsoffitti e gli strati interni di pareti e solai possono essere esplorati posizionando il punto di vista direttamente all'interno di questi volumi. Di conseguenza, la distribuzione spaziale degli elementi strutturali e degli impianti diventa immediatamente comprensibile, anche quando questi componenti sono progettati per rimanere nascosti all'interno dell'involucro edilizio. Tali prospettive sono particolarmente preziose per verificare il coordinamento tra le discipline, poiché molte interferenze si verificano proprio in queste zone nascoste in cui convergono componenti strutturali e diverse tipologie di sistemi MEP.

La piattaforma di VRex supporta anche sessioni multiutente, che permettono a più partecipanti di accedere ed esplorare lo stesso spazio virtuale contemporaneamente. Progettisti, ingegneri e coordinatori possono quindi esaminare il modello insieme, discutendo in tempo reale le problematiche rilevate. Questo ambiente condiviso facilita il coordinamento tra le discipline e consente uno scambio di osservazioni più immediato, particolarmente utile quando si affrontano conflitti spaziali complessi che coinvolgono diverse discipline.

Una serie di strumenti analitici integrati nell'interfaccia supporta ulteriormente l'interpretazione dei modelli. Tra questi, la possibilità di disabilitare la visibilità di specifici layer o modelli è essenziale per isolare i sistemi in esame e ridurre la complessità visiva. Un'altra funzione rilevante consente all'utente di interrogare singoli oggetti all'interno della scena. Selezionando un elemento, sia esso architettonico, strutturale o relativo agli impianti, il software visualizza i parametri e i metadati associati memorizzati nel modello IFC. Ciò consente di determinare quale disciplina ha generato l'elemento e di ispezionarne le proprietà, le dimensioni e la classificazione, contribuendo a chiarire l'origine di un'interferenza rilevata. Altri strumenti utili per l'indagine e la revisione del progetto sono la possibilità di fare sezioni su un piano a scelta, il comando di misura e il sistema di annotazione che permette di disegnare, scrivere e tracciare linee direttamente sul modello e sugli elementi presenti nell'ambiente virtuale.



Figura 59 – Strumenti interattivi per la revisione del progetto in VRex

Dal punto di vista grafico, la piattaforma non mira a riprodurre rendering di materiali altamente realistici. Le superfici appaiono semplificate e schematiche, enfatizzando la geometria piuttosto che il realismo visivo. Tuttavia, questa rappresentazione essenziale si rivela appropriata per le attività di coordinamento. Senza la distrazione di texture complesse o effetti di luce, la configurazione spaziale degli elementi rimane chiaramente leggibile, consentendo a conflitti, sovrapposizioni o posizionamenti errati di emergere immediatamente durante l'esplorazione del modello.

Completata la fase di ispezione e documentate le interferenze nei due ambienti selezionati, i file BCF generati sono stati esportati da VRex e trasferiti all'ambiente di BIM authoring per risolvere i problemi rilevati. I file sono stati quindi aperti in Autodesk Revit, dove sono serviti come riferimento per individuare e risolvere le criticità direttamente nel modello di progetto. In linea di principio, il formato BCF è progettato proprio per questo scopo: memorizza il punto di vista da cui è stato registrato il problema, gli elementi coinvolti nel conflitto e i commenti associati. Una volta importati in Revit, questi record dovrebbero guidare l'utente alla posizione esatta dell'interferenza rilevata, consentendo di analizzare e correggere il problema localmente all'interno del modello. Per accedere e gestire questi record, le "issues" BCF create in ambiente immersivo sono state aperte tramite BCF Manager, un plugin che consente a Revit di leggere e organizzare i dati di questo tipo di formato di file. Lo strumento fornisce un'interfaccia in cui ogni problematica appare come una voce strutturata contenente lo screenshot acquisito durante la revisione, note descrittive e riferimenti agli elementi coinvolti nella collisione. In teoria, la selezione di un problema e l'attivazione del comando correlato avrebbero dovuto riposizionare automaticamente la vista sul punto memorizzato, isolando i componenti rilevanti e consentendo un'ispezione immediata all'interno dell'ambiente di modellazione.

Tuttavia, nella pratica questo flusso di lavoro purtroppo si è rivelato più complesso e meno funzionale. La difficoltà principale è stata la localizzazione accurata dell'interferenza all'interno del modello. Sebbene il file BCF mantenga le coordinate del punto di vista associato a ciascuna interferenza, la struttura del progetto includeva più modelli collegati corrispondenti a discipline diverse. A causa di questa configurazione, Revit non è sempre riuscito a interpretare correttamente la posizione memorizzata in base al sistema di coordinate condiviso. Di conseguenza, la navigazione automatica verso la posizione dell'interferenza non ha sempre condotto al punto preciso in cui si era verificata la criticità e in alcuni casi non è stato proprio possibile eseguirla.

Un'ulteriore complicazione è emersa nei casi in cui le interferenze coinvolgevano elementi appartenenti a modelli collegati. Sebbene questi componenti fossero correttamente referenziati all'interno del record BCF ed elencati tra gli elementi coinvolti, l'interfaccia non è riuscita a fornire un comando diretto per evidenziarli o isolarli automaticamente nell'area di lavoro di Revit. Questa problematica rallenta il processo di risoluzione in modo impattante, poiché costringe il progettista a cercare manualmente gli elementi rilevanti in un modello composto da numerosi file interconnessi. In questo senso, l'interoperabilità tra VRex e Revit ha rivelato un limite non trascurabile, rendendo la transizione dalla revisione immersiva alla correzione pratica del modello più complessa del previsto.

Per superare questo ostacolo, si è utilizzato il comando "Seleziona elementi per ID" disponibile in Revit come soluzione alternativa. Ogni oggetto all'interno del modello BIM è associato a un identificatore univoco (ID) e il file BCF in genere registra questi riferimenti per gli elementi coinvolti nella collisione. Copiando il codice identificativo di uno di questi componenti e utilizzando il comando per individuarlo all'interno del progetto, è diventato possibile navigare direttamente all'oggetto corrispondente. Una volta trovato l'elemento nel modello, è stato possibile ispezionare il contesto circostante e correggere l'interferenza attraverso le opportune modifiche alla modellazione.

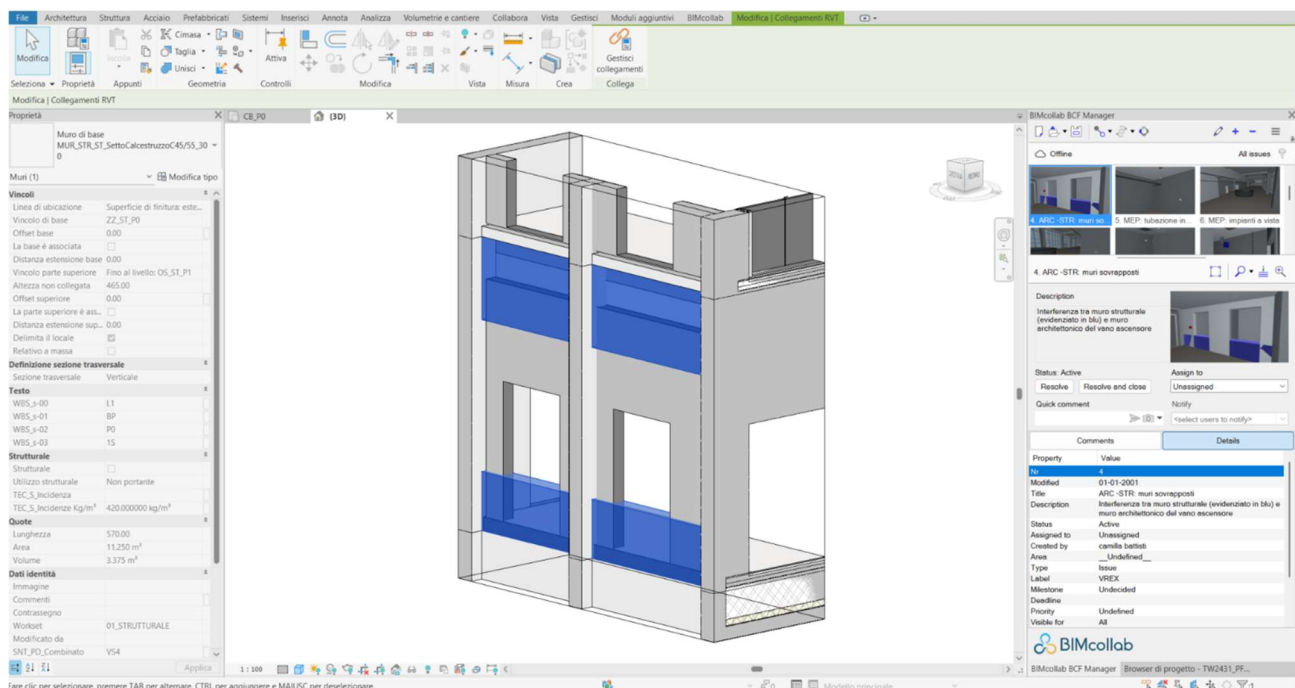


Figura 60 – Identificazione e risoluzione delle interferenze su Revit attraverso BCF Manager

Anche questa procedura non è stata sempre immediata. In diversi casi, il file BCF ha avuto difficoltà a riconoscere gli elementi appartenenti ai modelli collegati, poiché i loro identificatori si riferiscono a entità memorizzate in file esterni anziché nel progetto attivo. Di conseguenza, il processo di ricerca ha più volte richiesto di identificare prima gli elementi appartenenti al modello di lavoro corrente e di utilizzarli come riferimento spaziale per individuare i componenti associati provenienti dalle altre discipline. Attraverso questo metodo indiretto, è stato possibile ricostruire la posizione del conflitto, consentendo di analizzare e risolvere il problema nonostante i limiti di interoperabilità riscontrati nel flusso di lavoro.

L'analisi condotta attraverso il flusso di lavoro descritto ha inoltre permesso di trarre diverse osservazioni sulla natura e la distribuzione delle interferenze rilevate. La maggior parte delle criticità identificate nelle aree esaminate non deriva da contraddizioni progettuali intrinseche, bensì da imprecisioni di modellazione o da una mancanza di coordinamento tra i diversi modelli disciplinari. Una condizione ricorrente riguarda l'aggiornamento parziale dei modelli durante lo sviluppo del progetto. In caso di modifiche tecniche, adeguamenti del layout o cambiamenti di posizione in una disciplina, i corrispondenti aggiornamenti non sempre si riflettevano negli altri modelli. Di conseguenza, elementi precedentemente coordinati correttamente sono risultati disallineati, generando collisioni o conflitti spaziali emersi chiaramente durante l'ispezione immersiva.

La maggior parte delle interferenze trovate comprende componenti MEP. Questo risultato non è inaspettato, considerando sia la quantità che la complessità degli impianti richiesti in una struttura sanitaria. Gli impianti meccanici, elettrici e idraulici sono composti da un gran numero di elementi distribuiti (come tubi, condotti, canaline portacavi, apparecchiature tecniche, diffusori e dispositivi specializzati) spesso sviluppati e modellati da team separati responsabili di diversi sottosistemi. In queste condizioni, le incongruenze nel posizionamento o nel coordinamento tendono a verificarsi più frequentemente. Durante l'analisi, sono stati osservati diversi casi in cui tubazioni o condotti intersecavano elementi strutturali, attraversavano componenti architettonici senza le necessarie aperture o apparivano esposti in aree in cui avrebbero dovuto rimanere nascosti all'interno di cavedi o sopra controsoffitti. In altre situazioni, apparecchiature ed elementi di distribuzione appartenenti a sistemi diversi occupavano gli stessi volumi spaziali, rivelando lacune di gestione e comunicazione tra i rispettivi modelli di progettazione.

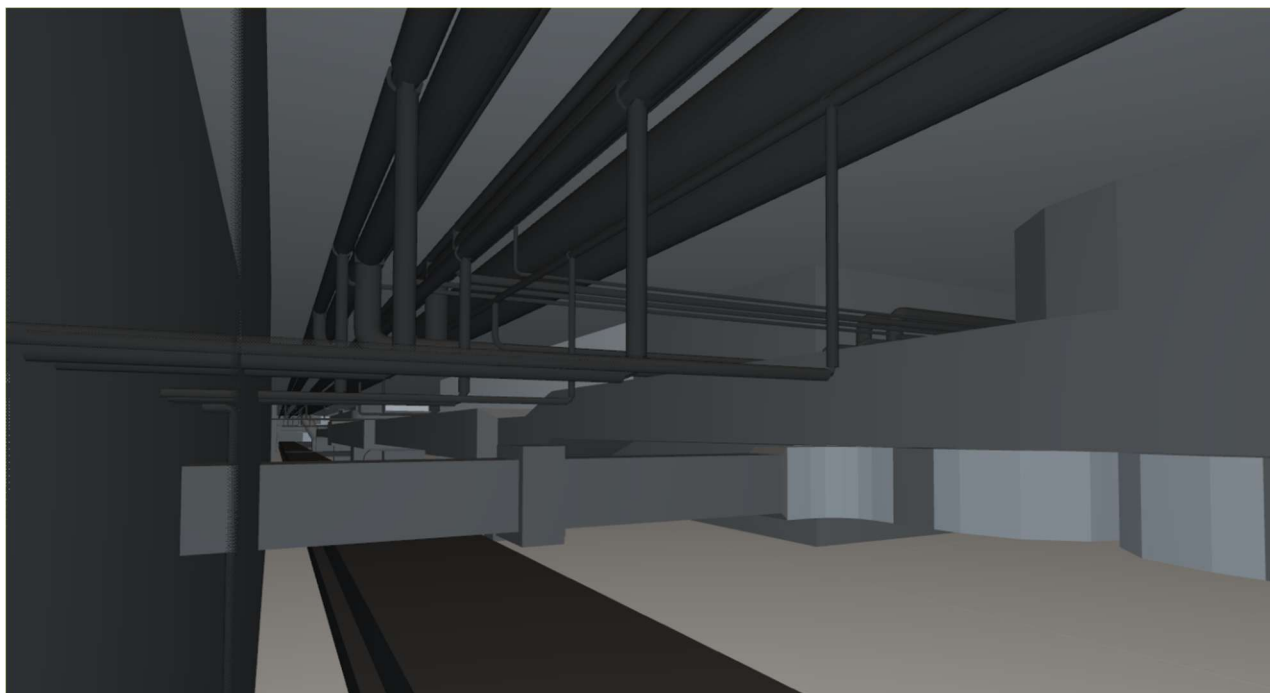


Figura 61 – Vista VR della concentrazione di impianti all'interno di un controsoffitto (VRex)

Dal punto di vista della metodologia adottata, l'uso della realtà virtuale per il rilevamento delle interferenze si è rivelato un prezioso strumento di supporto. Il processo ha dimostrato un buon livello di applicabilità e un potenziale considerevole, in particolare durante le fasi iniziali di progettazione, come il livello di Progetto di Fattibilità Tecnico Economica (PFTE) in cui si trova il Nuovo Ospedale di Cambiano. La possibilità di osservare le interferenze in scala 1:1 all'interno di un ambiente immersivo consente di interpretare i conflitti spaziali in modo più intuitivo rispetto alla tradizionale navigazione del modello. Interferenze che potrebbero apparire astratte o difficili da valutare su un monitor diventano immediatamente comprensibili se percepite dall'interno dello spazio stesso. Questa condizione supporta decisioni più consapevoli e facilita una valutazione più consapevole delle possibili soluzioni.

Un altro vantaggio significativo riguarda la dimensione collaborativa del processo. Gli ambienti immersivi multiutente consentono a più partecipanti di esplorare il modello simultaneamente, discutere i problemi rilevati in tempo reale e valutare collettivamente possibili modifiche progettuali. Nei progetti caratterizzati da un elevato livello di coordinamento interdisciplinare, come le strutture ospedaliere, questa capacità può contribuire a migliorare la comunicazione interna tra i diversi gruppi professionali coinvolti nel processo di progettazione.

Tuttavia, permangono alcuni limiti operativi. Come discusso precedentemente, l'efficacia del flusso di lavoro è in parte influenzata dall'interoperabilità tra i diversi strumenti software coinvolti e dall'affidabilità dello scambio di dati tra le piattaforme. Le difficoltà nell'individuazione delle interferenze all'interno dell'ambiente di creazione o nel riferimento a elementi appartenenti a modelli collegati introducono ulteriori passaggi nel processo di risoluzione, riducendo l'efficienza complessiva del metodo.

Nonostante questi vincoli, i risultati suggeriscono che il rilevamento immersivo delle interferenze ha il potenziale per rappresentare un approccio prezioso e innovativo in contesti specifici. Nelle aree dell'edificio caratterizzate da un'elevata concentrazione di impianti tecnici e componenti architettonici, come sale operatorie, spazi tecnici o zone di servizio, la possibilità di analizzare il modello in un ambiente immersivo può migliorare significativamente l'identificazione e la comprensione dei conflitti spaziali. In questi casi, lo sforzo aggiuntivo richiesto per condurre la revisione tramite strumenti di realtà virtuale può essere giustificato dal maggiore livello di dettaglio e consapevolezza raggiunto durante il processo di coordinamento. Al contrario, nelle porzioni dell'edificio in cui la densità degli impianti è inferiore e il rischio di interferenze è limitato, i metodi tradizionali di revisione del modello possono rimanere sufficienti, evitando il tempo aggiuntivo richiesto per condurre l'analisi tramite dispositivi immersivi.

Nei capitoli successivi verranno analizzate più nel dettaglio le interferenze rilevate, spiegandone le probabili cause e descrivendo l'approccio seguito per la loro risoluzione e la conseguente correzione dei modelli.

3.1.2. Clash Detection sale operatorie

La verifica dettagliata delle interferenze è stata inizialmente condotta all'interno del reparto operatorio situato al primo piano (P1) del progetto del Nuovo Ospedale di Cambiano ASL TO5. Questa porzione dell'edificio rappresenta una delle aree tecnicamente più impegnative di un edificio sanitario, a causa dell'elevata concentrazione di impianti, attrezzature e spazi specializzati necessari per le attività chirurgiche. L'area analizzata comprende diverse sale operatorie e gli spazi funzionali a supporto del loro funzionamento, tra cui depositi e uffici, aree di preparazione pre e post-operatoria per i pazienti ricoverati, corridoi di collegamento, corpi scala e blocchi ascensori che garantiscono la circolazione verticale all'interno della struttura. Il processo di rilevamento delle problematiche in questa zona è stato eseguito attraverso l'esplorazione immersiva del modello BIM all'interno dell'ambiente VRex. Navigando nello

spazio virtuale ed esaminando le relazioni spaziali tra i componenti dell'edificio, l'analisi si è concentrata sull'identificazione di punti caratterizzati da incongruenze progettuali, errori di modellazione o conflitti fisici tra gli elementi. Particolare attenzione è stata rivolta alla configurazione dei sistemi di servizio dell'edificio, la cui distribuzione spaziale all'interno di un ambiente ospedaliero è particolarmente complessa. L'ispezione si è quindi concentrata su situazioni in cui elementi meccanici, elettrici e idraulici si sovrapponevano ad altri componenti tecnici o interferivano con elementi architettonici e strutturali.

Tra gli elementi maggiormente coinvolti in problemi di coordinamento si sono rilevati i controsoffitti e gli impianti installati sopra di essi. Nell'ambito del progetto ospedaliero, l'altezza del soffitto di ogni tipologia di stanza è stata definita in base a requisiti funzionali e normativi. Ad esempio, spazi di lavoro come le sale operatorie o gli uffici sono progettati con un'altezza libera di circa 3,0 m, le aree di stoccaggio raggiungono in genere 2,7 m, gli spazi di collegamento come i corridoi e connettivi sono impostati a 2,5 m, mentre bagni e spogliatoi consentono generalmente un'altezza di circa 2,4 m. Questi valori non sono arbitrari: garantiscono condizioni spaziali adeguate per le attività svolte in ogni stanza, riservando al contempo il volume tecnico necessario tra la soletta strutturale e il controsoffitto per il passaggio di condotte meccaniche, tubazioni, canaline portacavi e altri impianti di servizio.

Dal punto di vista pratico, tuttavia, il coordinamento necessario per il corretto equilibrio tra layout architettonico e impianti tecnici può facilmente portare a incongruenze. La progettazione dei controsoffitti, il percorso degli impianti e la definizione dei vincoli progettuali coinvolgono diversi team disciplinari che lavorano in parallelo. Quando gli aggiornamenti vengono introdotti in un modello senza essere completamente sincronizzati con gli altri, possono emergere conflitti. All'interno del reparto operatorio esaminato, questa dinamica ha generato una serie di problemi relativi al percorso degli impianti, al posizionamento dei controsoffitti e alle distanze spaziali al di sopra di essi. In diversi casi, i componenti tecnici erano posizionati in modo errato, si sovrapponevano tra loro o occupavano spazi incompatibili con le altezze da rispettare.

Oltre alle zone dei controsoffitti, sono stati osservati anche ulteriori problemi di modellazione e coordinamento. Dispositivi elettrici e apparecchiature specializzate sono stati occasionalmente trovati scollegati dagli elementi architettonici a cui avrebbero dovuto essere associati, come pareti o pavimenti. Tubazioni, condotte e unità split spesso si sovrapponevano o intersecavano a causa del percorso errato delle reti di

servizio. Altre incongruenze hanno coinvolto componenti architettonici, inclusi mobili e arredi posizionati parzialmente all'interno delle pareti o non correttamente ancorati alle superfici del pavimento. Anche nella revisione degli impianti di illuminazione sono state riscontrate irregolarità, con pannelli LED posizionati in modo errato o completamente assenti in alcuni ambienti. Sono stati identificati anche conflitti strutturali, come penetrazioni tra pareti di taglio in cemento armato e partizioni architettoniche, insieme a quadri elettrici e altre apparecchiature tecniche situate in punti non appropriati. Un altro problema ricorrente è stata l'assenza di paratie a soffitto, comunemente chiamate velette. Questi elementi architettonici vengono solitamente introdotti per coprire le fessure che si creano quando controsoffitti adiacenti sono posizionati a diverse altezze. La loro assenza può esporre il vuoto tecnico sopra il soffitto o creare discontinuità tra gli spazi, rivelando carenze di coordinamento tra la definizione architettonica dei soffitti e la disposizione degli impianti nell'edificio.

Tutti questi punti sensibili sono stati identificati durante l'ispezione immersiva condotta in VRex. L'ambiente virtuale ha permesso di individuare e analizzare ogni interferenza direttamente nel contesto spaziale del reparto operativo. Una volta documentate tramite la compilazione del file BCF, le varie criticità rilevate sono state successivamente affrontate all'interno dei modelli Revit, dove sono state implementate le necessarie correzioni alla geometria, al posizionamento e al coordinamento tra le discipline.

Nella tabella che segue è presente un elenco delle principali interferenze individuate tramite l'analisi e l'osservazione del reparto operatorio del primo piano suddivise in base alle discipline coinvolte nel conflitto.

Tabella 6 – Elenco di interferenze trovate attraverso la clash detection immersiva nel blocco operatorio

ANALISI DELL'EINTERFERENZE INTERNE	
Disciplina	Tipologia di interferenza
Architettura (ARC)	Assenza di muri architettonici con funzione di contropareti dei setti strutturali
	Assenza di elementi di chiusura verticale, come le velette dei controsoffitti
	Posizioni errate o incoerenti dell'arredo ospedaliero
	Tipologie e altezze dei controsoffitti errate o non adatte alla funzione del locale
Impianti (MEP)	Sovrapposizioni di elementi impiantistici appartenenti a diversi settori
	Percorsi di tubazioni e condotti a vista nei locali abitabili
	Posizione dei rilevatori di fumo errata
	Posizione delle prese elettriche errata

ANALISI DELLE INTERFERENZE TRA LE VARIE DISCIPLINE	
Discipline	Tipologia di interferenza
Architettura e strutture (ARC – STR)	Sovrapposizione tra setti strutturali e muri architettonici
	Assenza delle dovute aperture per accesso agli ascensori
	Assenza muro architettonico di finitura in corrispondenza delle strutture
	Posizionamento di alcuni arredi in conflitto con gli elementi strutturali
Architettura e impianti (ARC – MEP)	Elementi appartenenti a discipline diverse sovrapposti o in collisione
	Tubazioni non collegate all'attrezzatura medica
	Sistemi impiantistici posizionati in corrispondenza di aperture dei muri
	Interferenza tra impianti e controsoffitti
Strutture e impianti (STR – MEP)	Non sono state rilevate interferenze tra queste due discipline

Invece di elencare i singoli conflitti, la tabella proposta organizza le problematiche individuate in base alle discipline coinvolte, distinguendo tra le interferenze che si verificano all'interno di un singolo modello da quelle che emergono dall'interazione tra settori diversi. Questa struttura aiuta a evidenziare quali ambiti di progettazione siano più suscettibili a problemi di coordinamento e chiarisce come queste criticità sorgano tipicamente durante lo sviluppo di un progetto sanitario complesso.

L'analisi condotta rivela che la maggioranza delle problematiche presenti riguarda le interazioni tra elementi architettonici e sistemi impiantistici (ARC-MEP). Questo risultato è motivato dalla complessità che caratterizza gli edifici ospedalieri, dove la quantità degli impianti tecnici è particolarmente elevata. Le reti meccaniche, elettriche e idrauliche occupano una parte significativa dello spazio tecnico disponibile e devono essere distribuite su soffitti, pareti, vani e corridoi di servizio. Allo stesso tempo, la progettazione architettonica definisce la configurazione spaziale delle stanze, il posizionamento di partizioni, controsoffitti ed elementi di finitura. Siccome queste due discipline condividono gli stessi domini spaziali, in particolare sopra i controsoffitti e all'interno delle intercapedini tecniche, la probabilità di sovrapposizione o disallineamento tra componenti architettonici e impianti è naturalmente più elevata. Anche piccoli aggiornamenti nella disposizione degli ambienti, nelle altezze dei soffitti o nel posizionamento delle apparecchiature possono facilmente portare a incongruenze se il percorso degli impianti tecnici non viene adattato di conseguenza.

Sono stati trovati anche conflitti tra architettura ed elementi strutturali (ARC-STR), sebbene generalmente derivino da un diverso tipo di interazione progettuale. Nella maggior parte dei progetti edilizi, il sistema strutturale viene definito dopo la definizione del layout architettonico iniziale e successivamente perfezionato attraverso le analisi strutturali richieste dalle normative tecniche in materia di stabilità, resistenza e prestazioni sismiche. Durante questo processo iterativo, componenti strutturali come pareti di taglio, pilastri o solai possono subire aggiustamenti dimensionali o modifiche posizionali. Poiché gli elementi architettonici sono spesso direttamente collegati alla struttura portante (pareti che completano i lati dei nuclei strutturali, pavimenti costruiti sopra i solai strutturali o rivestimenti che circondano i pilastri) le modifiche al modello strutturale richiedono spesso corrispondenti aggiustamenti in quello architettonico. Se questi aggiornamenti non sono perfettamente sincronizzati, si verificano incongruenze, con conseguenti sovrapposizioni o elementi di finitura mancanti.

Al contrario, la clash detection immersiva ha rivelato problemi di interazione molto limitati tra sistemi strutturali e MEP (STR-MEP) all'interno dell'area esaminata. Questo risultato può essere in parte attribuito alle priorità progettuali tipiche dei progetti ospedalieri. Data l'importanza critica del corretto funzionamento degli impianti tecnici nelle strutture sanitarie, particolare attenzione viene solitamente dedicata al coordinamento dei servizi dell'edificio durante il processo di progettazione. Gli elementi strutturali, d'altra parte, tendono a essere più stabili una volta definiti, subendo modifiche relativamente minori rispetto all'evoluzione più dinamica dei layout architettonici o degli impianti tecnici. Di conseguenza, il quadro strutturale fornisce generalmente un riferimento spaziale fisso all'interno del quale vengono instradate le reti tecniche, riducendo la probabilità di conflitti diretti tra queste due discipline.

Nel complesso, la distribuzione delle interferenze riscontrata evidenzia come le difficoltà di coordinamento tendano a concentrarsi in aree in cui più discipline occupano contemporaneamente gli stessi livelli spaziali. In ambienti altamente serviti come i reparti operatori, queste sovrapposizioni si verificano più frequentemente tra le configurazioni architettoniche e la fitta rete di sistemi meccanici ed elettrici necessari a supportare le attività chirurgiche.

La semplice classificazione di queste problematiche non illustra in modo completo come si sviluppa il processo di coordinamento una volta rilevato un conflitto. Per chiarire questo aspetto, di seguito verrà esaminata più nel dettaglio una selezione di tre casi specifici. Ogni esempio traccia la transizione dall'identificazione dei conflitti all'interno

dell'ambiente VR alle azioni correttive implementate nei modelli Revit. Attraverso questi casi, si vogliono evidenziare i passaggi pratici coinvolti nella revisione del progetto, nella regolazione della geometria degli elementi coinvolti e nel perfezionamento della modellazione in modo che l'interferenza identificata possa essere rimossa efficacemente.

01. ARC – MEP: impianti a vista e in collisione con il controsoffitto

Il primo caso esaminato riguarda un'interferenza ARC-MEP che coinvolge impianti tecnici esposti e la loro collisione con il sistema di controsoffitto. Il problema è stato identificato durante l'ispezione immersiva dell'ambiente all'interno di VRex. Dal punto di vista dell'utente nel modello virtuale, diversi componenti meccanici apparivano chiaramente visibili all'interno del volume del locale, anziché essere nascosti nello spazio tecnico sopra il controsoffitto. Questa condizione ha immediatamente indicato un'incoerenza di coordinamento tra il modello architettonico che definisce la geometria del controsoffitto e i modelli MEP responsabili del percorso degli impianti dell'edificio.

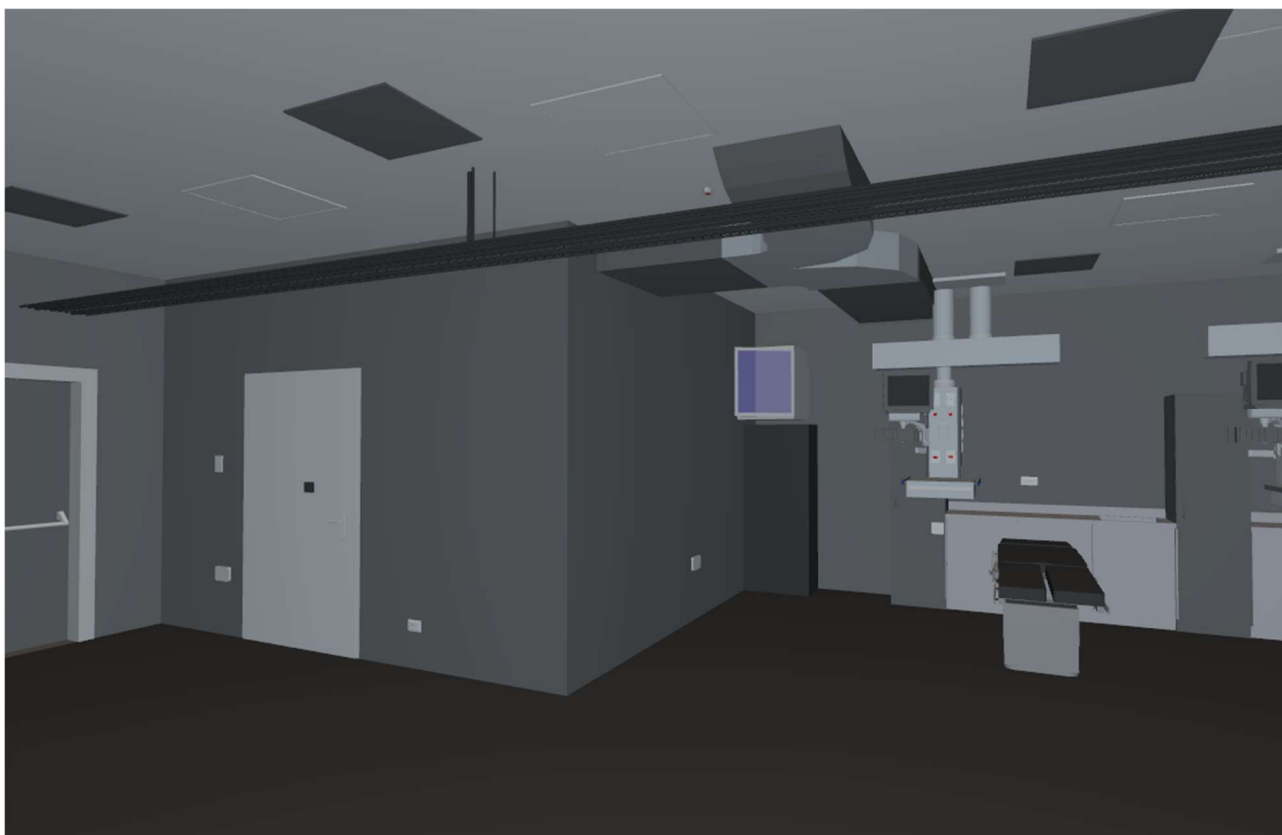


Figura 62 – Immagine catturata nell'ambiente virtuale di VRex dell'Interferenza 01 del blocco operatorio



Figura 63 – Localizzazione dell'interferenza 01 all'interno del blocco operatorio del P1

L'interferenza si verifica all'interno di una sala di preparazione preoperatoria situata direttamente di fronte agli ingressi delle sale chirurgiche. Spazi di questo tipo svolgono un ruolo cruciale nell'organizzazione funzionale di un reparto ospedaliero. Sono utilizzati per la preparazione dei pazienti prima dell'intervento, consentendo al personale sanitario di eseguire i controlli medici preliminari, le attività di monitoraggio e la preparazione finale necessaria prima del trasferimento del paziente nell'ambiente operatorio sterile. Data la loro vicinanza alle sale operatorie, queste aree sono progettate per mantenere elevati standard di igiene, accessibilità ed efficienza operativa. Qualsiasi irregolarità nel posizionamento degli impianti, in particolare tubazioni, condotti o apparecchiature a vista, può compromettere non solo l'ordine spaziale della stanza, ma anche la sua conformità ai rigorosi requisiti di progettazione sanitaria. Per questo motivo, la corretta integrazione tra elementi architettonici e impianti tecnici è particolarmente importante in questi spazi di transizione, dove l'ambiente deve rimanere pulito, ordinato e libero da inutili ostruzioni.

Un'ispezione più attenta ha rivelato che diversi elementi appartenenti a diversi impianti tecnici erano posizionati in modo errato. In particolare, un condotto di distribuzione dell'aria del modello aeraulico, diverse tubazioni del modello di scarico e ulteriori tubi di servizio della rete idraulica risultavano essere al di sotto del livello del controsoffitto,

entrando quindi nel volume abitabile della stanza. In una configurazione correttamente coordinata, questi componenti dovrebbero invece occupare lo spazio tecnico tra la soletta strutturale e i pannelli del controsoffitto, rimanendo completamente nascosti dall'ambiente interno. Il loro posizionamento errato rappresenta quindi sia un'incoerenza nella modellazione sia un problema di coordinamento progettuale tra le discipline architettonica e impiantistica.

Oltre a questa problematica, è stata individuata anche una collisione diretta tra le geometrie del condotto di ventilazione e di uno dei tubi di scarico. I due elementi occupavano la stessa area spaziale al di sopra della linea del soffitto, producendo un'intersezione fisica che si configurava come un ostacolo per l'installazione degli impianti. Questo specifico conflitto coinvolge componenti relativi a diversi sottosistemi MEP, ovvero distribuzione dell'aria e drenaggio sanitario, che vengono tipicamente sviluppati all'interno di modelli disciplinari separati (aeraulico e scarichi). Di conseguenza, l'interferenza evidenzia una mancanza di coordinamento non solo tra architettura e impiantistica, ma anche tra i diversi gruppi di progettazione MEP.

La visualizzazione immersiva ha aiutato molto nell'identificazione del problema. Navigando nell'ambiente virtuale a grandezza naturale, le tubazioni e i condotti esposti sono diventati subito visibili all'interno dello spazio, evidenziando l'incoerenza tra la configurazione architettonica prevista e l'effettivo posizionamento degli impianti tecnici. Questa tipologia di errore può essere difficile da interpretare attraverso disegni bidimensionali, viste o sezioni di modelli isolati, in particolare in aree caratterizzate da fitte reti di sistemi sovrapposti. L'esperienza diretta dello spazio in realtà virtuale ha permesso di riconoscere sia il posizionamento verticale sbagliato degli elementi che la loro collisione sopra il piano del soffitto.

Dal punto di vista della modellazione, la risoluzione di questa interferenza ha richiesto modifiche gestite su file diversi. Gli elementi coinvolti appartengono a quattro modelli distinti: il modello architettonico che contiene il sistema di controsoffitto, il modello aeraulico con il condotto di ventilazione, il modello idraulico per le tubazioni di servizio e il modello degli scarichi che definisce le reti di smaltimento. La correzione del problema si è quindi basata sulla revisione del posizionamento verticale e del percorso degli impianti tecnici, verificando al contempo che l'altezza del soffitto e lo spazio disponibile per il diffusore di ventilazione rimanessero coerenti con il progetto architettonico.

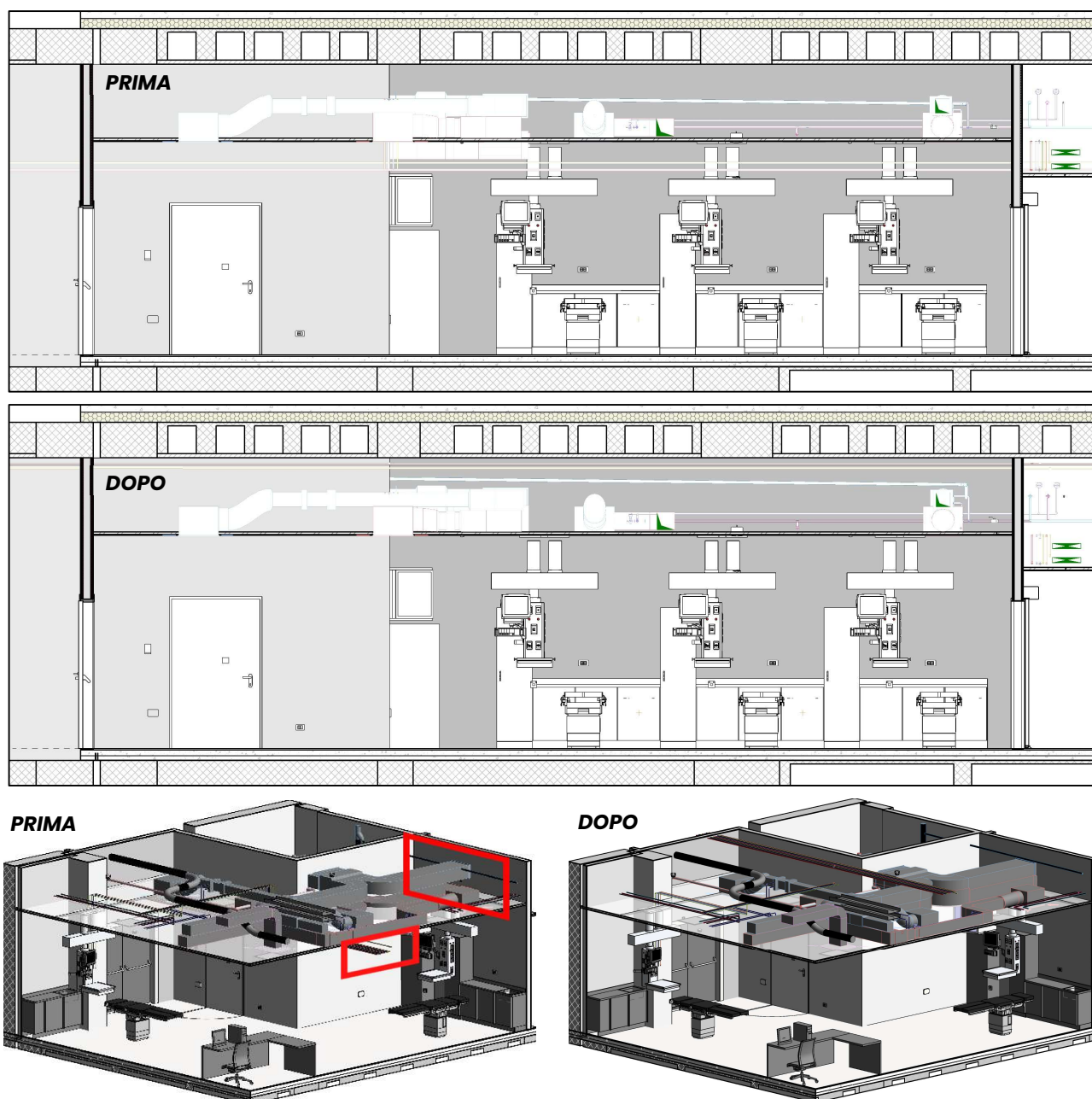


Figura 64 – Sezioni e viste 3D prima e dopo la correzione dell'interferenza 01 (sale operatorie)

A seguito dell'identificazione dell'interferenza, il processo di correzione è stato eseguito direttamente all'interno dell'ambiente di BIM authoring, attraverso il software Revit. La figura 64 mostra il passaggio dalla configurazione problematica iniziale alla soluzione coordinata ottenuta dopo la revisione dei modelli. L'intervento primario è stato il riposizionamento degli impianti MEP al di sopra del controsoffitto, ripristinando la corretta separazione tra lo spazio abitabile del locale e l'area tecnica riservata agli impianti. Una seconda azione correttiva ha affrontato la collisione diretta tra il condotto di ventilazione e il tubo di scarico. Il tubo di scarico è stato sollevato e leggermente regolato lungo il suo allineamento verticale in modo che non intersecasse più il condotto

di distribuzione dell'aria. Questa modifica ha garantito che i due impianti potessero coesistere all'interno dello spazio disponibile del controsoffitto senza occupare lo stesso volume fisico. L'adeguamento ha richiesto un'attenta valutazione poiché le tubazioni di drenaggio devono rispettare specifici vincoli progettuali, in particolare per quanto riguarda la pendenza minima richiesta per un corretto deflusso delle acque reflue secondo gli standard normativi. Per questo motivo, l'intero percorso della tubazione è stato esaminato prima di applicare la modifica, verificando che la pendenza necessaria potesse essere mantenuta lungo il percorso e che rimanesse sufficiente spazio libero lungo tutta la rete.

L'intervento non ha quindi comportato un semplice spostamento locale di singoli elementi. Ha invece richiesto una revisione controllata della configurazione spaziale degli impianti, supportata da verifiche precise su dimensioni, altezze e spazi liberi disponibili all'interno del controsoffitto. Ogni adeguamento è stato valutato in relazione ai componenti circostanti per garantire che la risoluzione di un problema non generasse nuovi conflitti con condotti, tubazioni, canaline portacavi o elementi strutturali adiacenti. Attraverso questo processo, gli impianti sono stati riorganizzati all'interno dello spazio tecnico, preservando sia i requisiti funzionali sia i vincoli architettonici definiti dall'altezza del controsoffitto.

02. ARC – STR: Posizione errata del setto strutturale

Il secondo caso riguarda un'interferenza ARC-STR relativa al posizionamento errato di una parete di taglio strutturale. Il problema consiste in una sovrapposizione diretta tra un muro architettonico e un setto strutturale, generata dal disallineamento tra i modelli architettonico e strutturale. In pratica, entrambi gli elementi occupano la stessa posizione spaziale all'interno dell'ambiente BIM, generando un conflitto geometrico che rende fisicamente impossibile la loro coesistenza. Il problema è emerso durante l'ispezione immersiva condotta in VRex, dove la sovrapposizione visiva dei due elementi è diventata evidente esplorando l'area di circolazione in prossimità degli ascensori di servizio. Il conflitto è stato successivamente verificato all'interno del modello Revit tramite viste sezionali e in pianta, che hanno confermato che la parete strutturale occupava lo stesso spazio destinato alla partizione non portante. L'interferenza non derivava da imprecisioni di modellazione, bensì da un mancato allineamento tra la configurazione architettonica e il progetto strutturale.



Figura 66 - Immagine catturata nell'ambiente virtuale di VRex dell'Interferenza 02 del blocco operatorio



Figura 65 - Localizzazione dell'interferenza 02 all'interno del blocco operatorio del P1

L'interferenza si trova all'interno del nucleo degli ascensori che servono la circolazione logistica del reparto operatorio, in particolare in corrispondenza degli ascensori evidenziati in verde nella vista in pianta. Questi ascensori svolgono un ruolo cruciale nel

funzionamento interno dell'ospedale. Sono dedicati alla movimentazione di forniture, materiali sterili, apparecchiature mediche e altre risorse logistiche richieste dal blocco operatorio. In quest'area, i flussi di circolazione sono attentamente organizzati per separare i diversi percorsi operativi e garantire un'efficiente distribuzione dei materiali. Oltre al tradizionale trasporto manuale, il sistema è progettato anche per ospitare veicoli a guida automatica (AGV - Automated Guided Vehicles). Si tratta di piattaforme robotiche autonome utilizzate in molti ospedali moderni per trasportare forniture, strumenti, farmaci e rifiuti all'interno dell'edificio. Gli AGV seguono percorsi predefiniti all'interno della struttura e interagiscono con infrastrutture logistiche dedicate, come corridoi di servizio, magazzini e sistemi di ascensori. Per questo motivo, l'organizzazione spaziale delle aree di sbarco degli ascensori deve essere attentamente progettata per consentire un movimento senza ostacoli sia al personale che ai sistemi automatizzati.

Durante lo sviluppo del progetto, il layout funzionale del reparto ha subito diverse revisioni, in particolare per quanto riguarda la distribuzione dei flussi interni e l'organizzazione della circolazione logistica. Una di queste variazioni ha comportato la modifica dell'orientamento del pianerottolo dell'ascensore su questo specifico piano. A differenza degli altri livelli dell'edificio, le porte dell'ascensore in quest'area dovevano aprirsi nella direzione opposta per supportare il corretto instradamento dei flussi logistici, dei movimenti degli AGV e della circolazione del personale. Di conseguenza, la disposizione architettonica è stata aggiornata: la parete architettonica adiacente all'ascensore è stata riposizionata sul lato appropriato e sono state introdotte le aperture necessarie per garantire l'accesso da e verso l'atrio dell'ascensore. Il lato opposto del vano doveva essere occupato dal setto strutturale. L'interferenza si è verificata proprio perché questa modifica architettonica non è stata incorporata nel modello strutturale. Mentre il team di architetti ha aggiornato la disposizione per riflettere la nuova configurazione, il progetto strutturale ha mantenuto la precedente disposizione delle pareti di taglio che circondano il nucleo. Di conseguenza, l'elemento strutturale è rimasto posizionato dove si trovava originariamente il muro non portante. Quando il modello architettonico aggiornato è stato combinato con il modello strutturale invariato, i due elementi si sono sovrapposti, generando un conflitto diretto tra le discipline.

Questa situazione rappresenta non solo un'incoerenza di modellazione, ma un errore di progettazione all'interno del processo di coordinamento strutturale. Elementi come le pareti di taglio sono componenti fondamentali del sistema portante dell'edificio e devono essere definiti con un preciso riferimento alla configurazione architettonica

finale. Le loro dimensioni e il loro posizionamento non sono arbitrari; sono determinati attraverso analisi strutturali che valutano la distribuzione del carico, i requisiti di resistenza e il comportamento sismico secondo gli standard normativi. Se la posizione di un elemento strutturale non corrisponde all'effettiva disposizione architettonica, l'affidabilità di queste analisi può essere compromessa. Per questo motivo, è essenziale che il sistema strutturale sia verificato e dimensionato sulla base della corretta e definitiva configurazione della disposizione architettonica, garantendo che i calcoli strutturali riflettano accuratamente la relazione spaziale tra la struttura portante e i componenti architettonici.

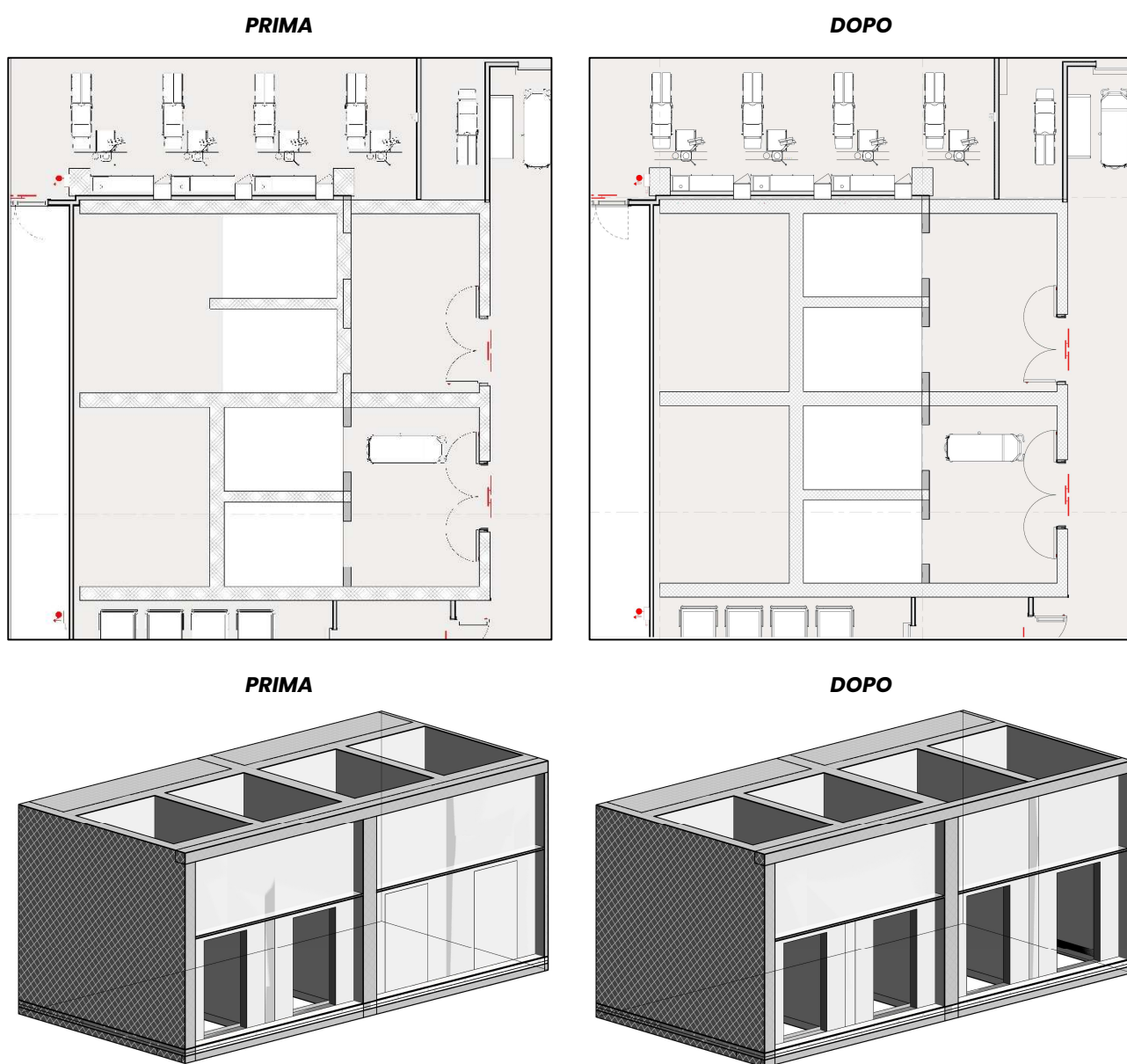


Figura 67 - Planimetrie e viste 3D prima e dopo la correzione dell'interferenza 02 (sale operatorie)

Il rilevamento di questa interferenza evidenzia quindi l'importanza di un coordinamento continuo tra le discipline durante tutto il processo di progettazione. Le modifiche strutturali devono sempre rispondere agli aggiornamenti architettonici, soprattutto in ambiti in cui requisiti funzionali, come la logistica ospedaliera e i sistemi di trasporto automatizzati, richiedono adeguamenti all'organizzazione spaziale dell'edificio. Senza questo allineamento, anche discrepanze relativamente piccole possono generare conflitti che incidono non solo sul modello BIM, ma anche sull'affidabilità strutturale e sulla realizzabilità del progetto.

La risoluzione del conflitto ha richiesto un intervento principalmente sul modello strutturale. Il setto in questione è stato riposizionato in base al layout architettonico aggiornato che definisce la corretta configurazione dell'area di sbarco dell'ascensore. Prima di applicare definitivamente la modifica, i progettisti strutturali hanno rivalutato l'elemento attraverso analisi di carico e dimensionamento, verificando che lo spostamento della parete non avrebbe compromesso le prestazioni strutturali del sistema. Questi controlli hanno garantito che la nuova posizione rimanesse compatibile con lo schema portante dell'edificio e con i requisiti strutturali stabiliti dalle normative di progettazione.

Una volta riposizionato l'elemento strutturale, il modello architettonico è stato aggiornato di conseguenza. Gli strati di finitura associati alle pareti portanti sono stati aggiunti e modificati in modo che la partizione architettonica e il nucleo strutturale fossero correttamente allineati. Questo passaggio è stato necessario per mantenere la coerenza tra la struttura e l'involucro non portante, garantendo che il setto e i suoi elementi di finitura corrispondessero spazialmente e geometricamente nei modelli coordinati. Grazie a queste modifiche coordinate, la sovrapposizione tra le due discipline è stata eliminata e la configurazione del nucleo dell'ascensore è stata ripristinata in uno stato coerente e realizzabile.

03. ARC – MEP: Tubature non collegate alle attrezzature mediche

Il terzo caso riguarda un'incongruenza ARC-MEP relativa a tubazioni di servizio non collegate alle apparecchiature medicali installate in sala operatoria. Come visibile nello screenshot catturato nell'ambiente virtuale, diverse tubazioni che scendono dal soffitto, destinate a fornire servizi essenziali alle apparecchiature chirurgiche, terminano senza collegarsi ai dispositivi che dovrebbero servire.



Figura 69 – Immagine catturata nell’ambiente virtuale di VRex dell’Interferenza 03 del blocco operatorio



Figura 68 - Localizzazione dell'interferenza 03 all'interno del blocco operatorio del P1

L'interferenza si verifica all'interno di una delle sale operatorie più piccole del blocco chirurgico, in particolare una sala operatoria di emergenza. Nonostante le sue dimensioni ridotte rispetto ad alcune altre sale, questo spazio svolge un ruolo critico

all'interno dell'ospedale perché è dedicato a procedure chirurgiche urgenti in cui i tempi di risposta e l'efficienza operativa sono fondamentali. In ambienti di questo tipo, la disposizione delle apparecchiature, il percorso degli impianti tecnici e il posizionamento dei collegamenti devono essere attentamente coordinati. Anche piccole incongruenze possono compromettere la funzionalità dello spazio o complicare il lavoro dell'équipe chirurgica.

Nella configurazione osservata, le tubazioni destinate ad alimentare il sistema angiografico e le apparecchiature per anestesia appaiono scollegate dalle macchine situate sotto le strutture di supporto montate a soffitto. Questi sistemi richiedono in genere molteplici collegamenti tecnici: gas medicali, alimentazione elettrica, linee dati e talvolta interfacce di raffreddamento o ventilazione. Se questi collegamenti non sono correttamente allineati con la posizione finale delle apparecchiature, i dispositivi non possono essere installati o utilizzati correttamente. L'errore indica quindi una lacuna di coordinamento tra il modello architettonico che definisce il layout della sala operatoria e i modelli MEP responsabili dell'instradamento dei servizi tecnici.

Sono state rilevate ulteriori incongruenze nella stessa area. Un pannello di distribuzione tecnica, correlato alla distribuzione dei gas medicali, è posizionato direttamente all'interno dell'apertura della porta di una stanza secondaria adiacente alla sala operatoria. I collettori per gas medicali sono componenti essenziali negli ambienti chirurgici perché regolano e distribuiscono gas come ossigeno, aria compressa, protossido di azoto e sistemi per vuoto utilizzati durante le procedure mediche e l'anestesia. La loro posizione deve rimanere facilmente accessibile per la manutenzione e il controllo di emergenza, evitando al contempo interferenze con i percorsi di circolazione. In questo caso, il pannello occupa la stessa posizione spaziale della porta architettonica, rendendo la configurazione fisicamente impossibile. Per documentare chiaramente il problema, l'elemento porta è stato temporaneamente nascosto all'interno dell'ambiente VRex per rivelare i componenti sovrapposti ed evidenziare l'incoerenza progettuale.

Altre irregolarità includono tubazioni visibili che corrono sotto la linea del soffitto, il che suggerisce che parti degli impianti tecnici siano state modellate senza rispettare l'intercapedine prevista. Questa condizione è particolarmente problematica nelle sale operatorie, dove i controsoffitti non svolgono solo una funzione estetica, ma coinvolgono anche i requisiti igienici, i sistemi di illuminazione integrati, i diffusori a flusso laminare e gli impianti tecnici nascosti.

La visualizzazione immersiva è stata particolarmente utile nell'identificazione di questo tipo di problema di coordinamento. Osservando la sala operatoria a grandezza naturale, il disallineamento tra le apparecchiature e i servizi associati è diventato subito evidente. Nelle viste tradizionali in pianta o in sezione, tubazioni scollegate o pannelli posizionati in modo errato possono facilmente passare inosservati nella complessità dei disegni tecnici. Invece, l'esperienza spaziale offerta dalla realtà virtuale evidenzia le incongruenze in modo molto più intuitivo.

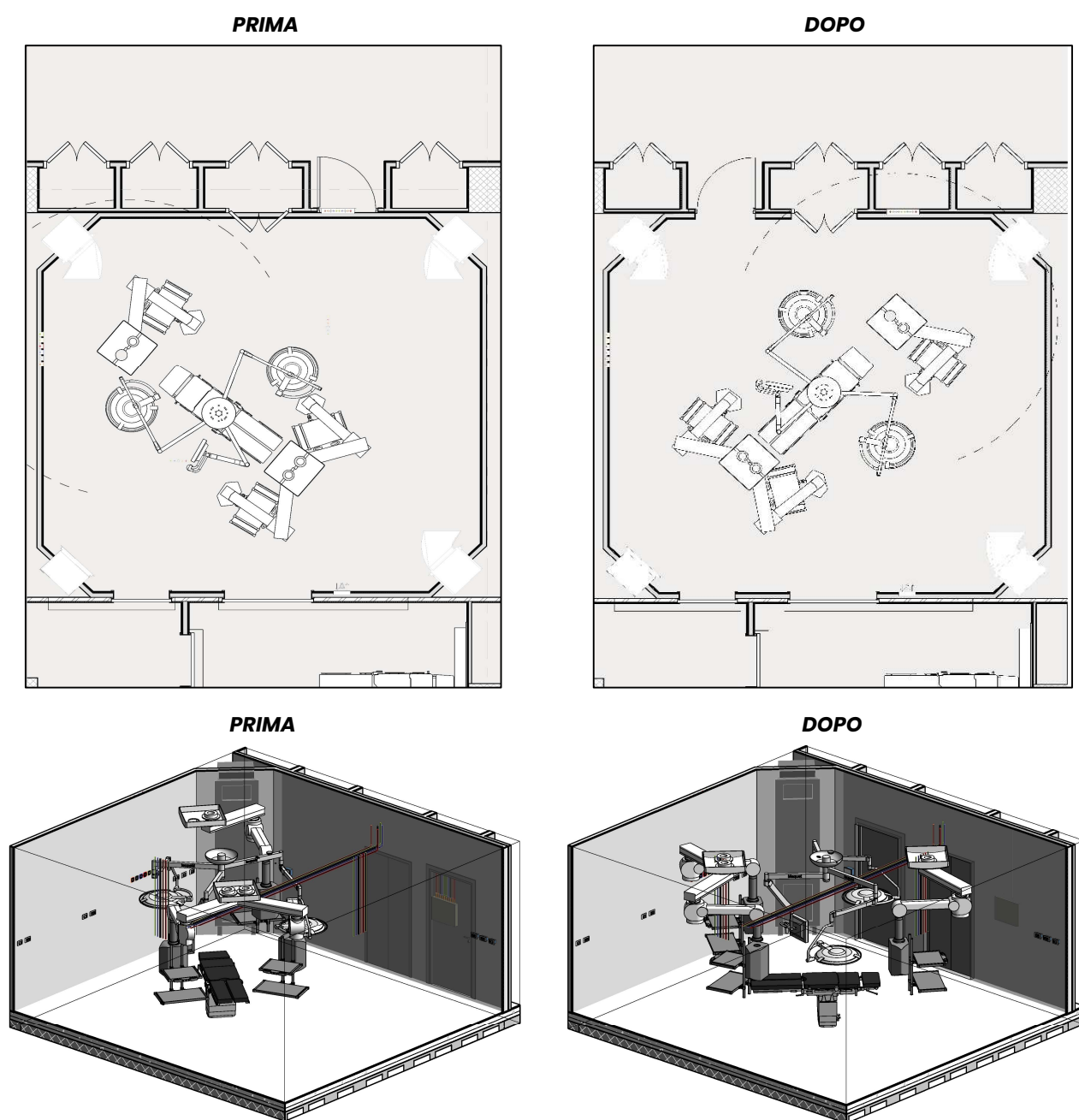


Figura 70 - Planimetrie e viste 3D prima e dopo la correzione dell'interferenza 03 (sale operatorie)

La risoluzione di questi problemi di coordinamento ha richiesto una riconsiderazione del rapporto spaziale tra la disposizione architettonica, le apparecchiature medicali e gli impianti tecnici all'interno della sala operatoria. Anziché modificare il percorso degli impianti MEP, già integrati in una fitta rete di servizi, la strategia progettuale si è concentrata sull'adattamento della configurazione architettonica e del posizionamento delle apparecchiature medicali per allinearli all'infrastruttura esistente.

Il primo intervento ha riguardato la disposizione delle apparecchiature chirurgiche all'interno della sala operatoria. La posizione dell'unità angiografica, insieme alle lampade scialitiche e alle apparecchiature ausiliarie associate, è stata rivista e specchiata in modo efficace rispetto alla configurazione originale. Questa modifica ha garantito che le tubazioni di servizio potessero raggiungere i corretti punti di collegamento delle macchine. Nella configurazione rivista, le linee tecniche che alimentano le apparecchiature, come gas medicali, condotte elettriche e altri collegamenti di servizio, si allineano correttamente con l'infrastruttura montata a soffitto, eliminando la precedente discrepanza tra gli impianti e i dispositivi che erano destinati a servire.

Un'ulteriore modifica ha risolto il conflitto tra il pannello del collettore tecnico e l'apertura della porta. Come mostrato negli schemi planimetrici, la porta di interferenza collegava originariamente la sala operatoria al corridoio di collegamento "sporco", un'area dedicata alla circolazione di materiali chirurgici usati, apparecchiature non sterilizzate, letti di trasporto e strumenti che necessitano di pulizia e disinfezione. L'apertura adiacente conduce invece a un piccolo locale tecnico associato alla sala operatoria, tipicamente utilizzato per ospitare rack di dati, quadri elettrici o altre apparecchiature di controllo necessarie al funzionamento dei dispositivi medici. In questo caso, la porta che si sovrapponeva al collettore è stata riposizionata in una posizione diversa lungo lo stesso corridoio. La nuova apertura è stata introdotta in corrispondenza di un locale che in precedenza non aveva accesso diretto dalla sala operatoria ed era quindi funzionalmente ridondante. Poiché il corridoio di servizio contiene già diversi spazi ausiliari, magazzini e vani tecnici, lo spazio precedentemente destinato a locale rack aggiuntivo si è rivelato superfluo. La sua posizione è stata quindi riadattata per ospitare la porta di accesso che collega la sala operatoria al percorso di circolazione sporco.

La decisione di mantenere invariata la configurazione degli impianti è giustificata dal fatto che nelle sale operatorie la concentrazione di elementi tecnici è estremamente elevata: condotti di ventilazione, linee di gas medicali, condotte elettriche, cavi di

monitoraggio e infrastrutture di supporto convergono tutti all'interno del limitato spazio vuoto del controsoffitto sopra l'area chirurgica. Ottenere una configurazione coordinata per queste reti richiede in genere un ampio allineamento tra diverse discipline ingegneristiche. Modificare questa infrastruttura dopo averla coordinata potrebbe potenzialmente innescare una cascata di ulteriori conflitti che interessano altri sistemi. Per questo motivo, adattare il layout architettonico e la disposizione delle apparecchiature ha rappresentato una soluzione più efficiente e meno invasiva. Sebbene gli elementi architettonici debbano comunque rispettare standard dimensionali, requisiti di sicurezza e vincoli funzionali, la loro modifica ha generalmente un impatto minore sulle prestazioni tecniche della sala operatoria rispetto alle modifiche all'infrastruttura impiantistica. Riorganizzando la disposizione spaziale delle apparecchiature e ridistribuendo le aperture delle porte, il progetto è stato in grado di ripristinare la coerenza tra architettura, dispositivi medici e servizi dell'edificio senza compromettere l'efficienza operativa dell'ambiente chirurgico.

3.1.3. Clash Detection degenze

Dopo aver esaminato il reparto operatorio, il processo di rilevamento delle interferenze è stato esteso al reparto di degenza situato al quinto piano dell'ospedale. Quest'area presenta una configurazione spaziale e una complessità tecnica significativamente diverse dal blocco operatorio. Invece di ambienti clinici altamente specializzati, dominati da apparecchiature mediche avanzate e sistemi tecnici densi, il reparto è composto principalmente da spazi dedicati all'alloggio dei pazienti e alle attività sanitarie quotidiane. La disposizione comprende stanze singole e doppie, oltre a una varietà di spazi di supporto come sale comuni, postazioni infermieristiche, ambulatori medici, aree di lavoro per gli infermieri, piccole cucine per le pause del personale, magazzini, depositi farmaceutici e bagni assistiti.

In questo contesto, la componente architettonica diventa l'elemento dominante del progetto. L'ambiente deve offrire comfort, chiarezza di circolazione e un'atmosfera accogliente per pazienti e personale, pur soddisfacendo i requisiti funzionali di una struttura sanitaria. Gli impianti tecnici rimangono essenziali, ma sono generalmente meno concentrati e meno specializzati rispetto a quelli presenti nelle sale operatorie. Gli impianti presenti in queste stanze consistono principalmente in installazioni comuni come pannelli radianti, sistemi di drenaggio sanitario e condotti di ventilazione, che sono distribuiti in modo più uniforme al piano e richiedono in genere un coordinamento

spaziale inferiore rispetto alle complesse reti meccaniche che servono le aree chirurgiche.

Per questo motivo, il processo di rilevamento delle interferenze nel reparto di degenza si è concentrato principalmente sul coordinamento architettonico e sulla coerenza della modellazione, pur tenendo conto dell'interazione con i sistemi strutturali e MEP. Si è prestata particolare attenzione alla corretta configurazione di controsoffitti, partizioni verticali ed elementi di finitura, poiché questi componenti influenzano fortemente sia la qualità spaziale che le prestazioni tecniche delle stanze. Tra le problematiche più ricorrenti identificate durante l'ispezione immersiva figurano l'assenza di velette, il posizionamento o l'altezza errati dei controsoffitti, la mancanza di aperture per porte o di attraversamenti di servizi all'interno delle pareti divisorie e il disallineamento di alcune pareti architettoniche. Ulteriori incongruenze hanno coinvolto elementi di arredo posizionati in modo errato, conflitti tra diversi sistemi tecnici, sovrapposizioni tra partizioni architettoniche e setti strutturali, muri che si estendono oltre l'altezza prevista e intersecano le solette strutturali, e l'assenza di strati di finitura attorno ai pilastri portanti.

Sebbene queste problematiche possano apparire meno critiche rispetto ai conflitti altamente tecnici osservati in sala operatoria, rappresentano comunque importanti problemi di coordinamento. Negli ambienti di degenza, dove la configurazione architettonica influisce direttamente su usabilità, comfort e accessibilità, imprecisioni nel posizionamento di pareti, soffitti o aperture possono alterare significativamente la funzionalità prevista degli spazi. L'uso della realtà virtuale immersiva si è rivelato uno strumento di supporto nell'analisi di queste condizioni. Osservando il reparto attraverso il visore, è diventato più facile percepire le relazioni spaziali tra elementi architettonici, arredi e sistemi costruttivi. In molti casi, irregolarità come pareti disallineate, soffitti posizionati in modo errato o elementi di finitura mancanti sono diventate immediatamente visibili se percepite dall'interno dell'ambiente virtuale. La prospettiva immersiva ha quindi supportato un'interpretazione più intuitiva del modello, aiutando a identificare incongruenze che altrimenti potrebbero essere difficili da rilevare attraverso la documentazione bidimensionale convenzionale o viste BIM isolate.

Nella tabella seguente viene fornita una panoramica sulle principali criticità rilevate dalla clash detection immersiva svolta nel reparto di degenza del quinto piano del Nuovo Ospedale ASL TO 5, suddivise in base alle discipline coinvolte nel conflitto.

Tabella 7 - Elenco di interferenze trovate attraverso la clash detection immersiva nel reparto di degenza

ANALISI DELL'EINTERFERENZE INTERNE	
Disciplina	Tipologia di interferenza
Architettura (ARC)	Assenza delle aperture per gli infissi nelle contropareti adiacenti alle facciate
	Assenza di elementi di chiusura verticale, come le velette dei controsoffitti
	Errore nella definizione del perimetro di alcuni pavimenti architettonici
	Tipologie e altezze dei controsoffitti errate o non adatte alla funzione del locale
	Assenza di alcune porte REI di collegamento nei corridoi connettivi
	Posizione errata di alcuni arredi e loro sovrapposizione con elementi architettonici
Impianti (MEP)	Sovrapposizioni di elementi impiantistici appartenenti a diversi settori
	Percorsi di tubazioni e condotti a vista nei locali abitabili
	Posizione errata dei dispositivi di illuminazione
	Posizione errata delle tubature sanitarie e di scarico
ANALISI DELLE INTERFERENZE TRA LE VARIE DISCIPLINE	
Discipline	Tipologia di interferenza
Architettura e strutture (ARC – STR)	Sovrapposizione tra setti strutturali e muri architettonici
	Pareti architettoniche intersecano il solaio strutturale
	Assenza finiture architettoniche dei pilastri portanti
Architettura e impianti (ARC – MEP)	Elementi appartenenti a discipline diverse sovrapposti o in collisione
	Tubazioni e condotti posizionati al di fuori dei muri
	Sistemi impiantistici posizionati in corrispondenza di aperture dei muri
	Interferenza tra impianti e controsoffitti
Strutture e impianti (STR – MEP)	Non sono state rilevate interferenze tra queste due discipline

La distribuzione dei conflitti rivela una chiara tendenza: la maggior parte dei problemi rilevati riguarda elementi architettonici, mentre le interazioni che coinvolgono componenti strutturali o impianti sono relativamente più limitate. Questa predominanza è in gran parte correlata all'organizzazione del processo di progettazione e alla suddivisione dei modelli BIM. Il progetto architettonico dell'edificio non è contenuto in un unico file, ma è invece suddiviso in più modelli coordinati sviluppati da diversi team. Alcuni di questi gruppi operano all'interno dell'ufficio di progettazione principale, mentre altri contribuiscono come consulenti esterni responsabili di componenti specifici del progetto. Un esempio rilevante riguarda il sistema di facciata, progettato da uno studio esterno specializzato in tecnologie di involucro. A causa di questa separazione di

responsabilità, il mantenimento di un allineamento continuo tra il modello di facciata e i modelli architettonici interni richiede un attento coordinamento durante tutto il processo di progettazione.

All'interno dell'ambito architettonico vero e proprio, tre modelli distinti contribuiscono alla definizione dello spazio costruito. Questi includono il layout interno, il sistema di facciata e modelli aggiuntivi relativi agli elementi di arredo. Per facilitare l'interazione tra questi ambiti, il progetto ha adottato una strategia specifica: è stata introdotta una controparete architettonica di riferimento lungo il perimetro dell'edificio. Questa partizione interna funge da supporto per i pannelli di facciata, costituiti da elementi prefabbricati opachi e trasparenti. L'utilizzo di questo strato intermedio consente di progettare gli spazi interni indipendentemente dalla geometria della facciata, semplificando la gestione del layout interno pur mantenendo un'interfaccia strutturale chiara per l'involucro esterno. Dal punto di vista costruttivo, questa soluzione riflette anche l'effettiva logica di assemblaggio della facciata. I pannelli sono concepiti per essere appesi a un elemento di sostegno, rappresentato dai solai strutturali e dalle contropareti posizionate all'interno del perimetro dell'edificio. Tuttavia, l'adozione di questo sistema introduce un requisito critico di coordinamento per quanto riguarda il posizionamento delle aperture. Una volta che il team di progettazione della facciata ha definito la posizione delle finestre, il team di architetti responsabile della disposizione interna deve assicurarsi che le aperture corrispondenti all'interno della controparete si allineino perfettamente con tali posizioni. Qualsiasi discrepanza tra i due modelli può bloccare il passaggio della luce naturale o creare conflitti geometrici tra i pannelli della facciata e le partizioni interne. La clash detection eseguita in ambiente virtuale ha rilevato diversi casi in cui le aperture per gli infissi erano mancanti o posizionate in modo errato, a dimostrazione della difficoltà di mantenere un allineamento costante tra modelli sviluppati in modo indipendente.

Oltre a questi problemi relativi alla facciata, il modello architettonico presentava anche interferenze legate a controsoffitti, elementi di chiusura mancanti, contorni dei solai definiti in modo errato o elementi di arredo posizionati senza un corretto riferimento alla geometria circostante. Questi tipi di errori si verificano in genere quando diverse parti del modello architettonico evolvono in modo asincrono o quando gli aggiornamenti introdotti in un file non vengono propagati immediatamente agli altri.

Sebbene meno numerose, sono state rilevate anche diverse interazioni tra architettura e impiantistica (ARC-MEP). Anche in un reparto in cui gli impianti tecnici sono meno

specializzati rispetto a quelli delle sale operatorie, la loro presenza richiede comunque un'attenta integrazione con gli elementi architettonici circostanti. Apparecchi di illuminazione, condotti di ventilazione e tubazioni sanitarie devono essere coordinati con soffitti, pareti e aperture per evitare conflitti, come percorsi tecnici visibili all'interno di locali abitati o impianti che intersecano elementi architettonici.

Il rapporto tra componenti strutturali e impiantistici (STR-MEP), invece, risulta quasi del tutto priva di conflitti in questa porzione del complesso ospedaliero. Questo risultato è coerente con le osservazioni già effettuate all'interno del reparto operatorio. Gli elementi strutturali sono in genere caratterizzati da meno modifiche geometriche una volta definita la loro posizione e, nelle aree con una minore densità di sistemi tecnici e impiantistici, tendono a fungere da riferimento spaziale stabile. Nel reparto di degenza, molti percorsi MEP sono quindi organizzati attorno alla struttura portante anziché interferire con essa, diminuendo la presenza di interferenze dirette tra queste discipline.

Di seguito sono analizzati più da vicino tre casi di interferenze riscontrate nel reparto di degenza durante l'analisi in ambiente virtuale. Inoltre verranno descritte, per ognuno di essi, le procedure di correzione e gestione del coordinamento interdisciplinare condotte per la risoluzione delle varie problematiche.

01. ARC: mancanza delle aperture nelle contropareti

La prima interferenza analizzata nel reparto di degenza riguarda l'incoerenza architettonica legata all'assenza di aperture nelle contropareti interne che si interfacciano con il sistema di facciata. Questi elementi architettonici definiscono il perimetro interno del reparto e fungono da superficie di riferimento su cui si collegano i pannelli di facciata. Nella configurazione esaminata, tuttavia, diverse di queste partizioni sono state modellate come pareti continue, prive delle necessarie aperture corrispondenti ai moduli finestra presenti nel modello di facciata.

Questa discrepanza è diventata evidente durante il processo di rilevamento immersivo delle interferenze condotto in VRex. In un normale scenario di navigazione all'interno dell'ambiente virtuale, il problema non risulta immediatamente visibile. Quando il modello architettonico viene visualizzato come oggetto solido, la controparete blocca completamente la vista verso lo strato esterno di facciata, impedendo all'utente di percepire se gli elementi siano allineati con le partizioni interne. Di conseguenza, la presenza di finestre nell'involucro non può essere rilevata direttamente dagli spazi

navigabili. Per superare questa limitazione, l'analisi ha comportato la manipolazione selettiva della visibilità dei modelli durante l'ispezione immersiva. Per ogni coppia di discipline esaminate durante il rilevamento delle interferenze, un modello è stato temporaneamente visualizzato in trasparenza o parzialmente nascosto, mentre l'altro è rimasto completamente visibile. Questa procedura è stata applicata ai modelli di facciata e architettonico ed ha permesso ai pannelli dell'involucro esterno di diventare visibili dietro le contropareti interne. Una volta visualizzati gli elementi architettonici in trasparenza, o con i muri perimetrali temporaneamente nascosti, è diventato evidente che molte finestre della facciata non presentavano aperture corrispondenti nelle partizioni interne. Così l'incongruenza tra i due modelli è stata immediatamente riconosciuta. La facciata mostrava i moduli finestra posizionati correttamente, mentre la geometria architettonica rimaneva ininterrotta, sigillando di fatto le aperture che avrebbero dovuto consentire alla luce naturale di penetrare negli spazi interni.

L'incoerenza non era limitata a una singola posizione, ma si estendeva lungo ampie porzioni del perimetro del reparto. Infatti, l'intervento correttivo ha comportato la revisione dell'intero reparto. La maggior parte delle pareti interessate corrisponde alle partizioni perimetrali delle stanze di degenza, degli ambulatori e degli uffici, tutte aree in cui la presenza di luce naturale è un importante requisito architettonico e funzionale. Inoltre, la disposizione dei piani include anche aperture interne che si estendono fino al piano terra nella parte centrale del reparto. Questi spazi forniscono luce naturale ai corridoi connettivi attraverso ulteriori aperture sulla facciata che si affacciano sui patii. Anche in questo caso si è verificata la stessa incoerenza di modellazione, con le finestre della facciata posizionate correttamente nel modello dell'involucro ma non riflesse nella geometria delle contropareti interne.

Grazie all'uso della realtà virtuale questo tipo di errore di coordinamento è stato efficacemente identificato. Le relazioni spaziali tra il sistema di facciata e le partizioni architettoniche interne vengono percepite più facilmente navigando nel reparto a grandezza naturale, e comprendendo l'ambiente dal punto di vista di un occupante reale. L'ispezione immersiva ha inoltre reso facile l'individuazione di aperture mancanti presenti lungo il perimetro dell'edificio, consentendo così un controllo completo delle pareti architettoniche che delineano l'interfaccia tra gli spazi interni e il sistema di facciata. Il controllo dinamico della visibilità dei modelli all'interno di VRex ha anche permesso all'analisi di passare velocemente da un segmento di facciata all'altro, garantendo una revisione completa di tutte le pareti architettoniche.

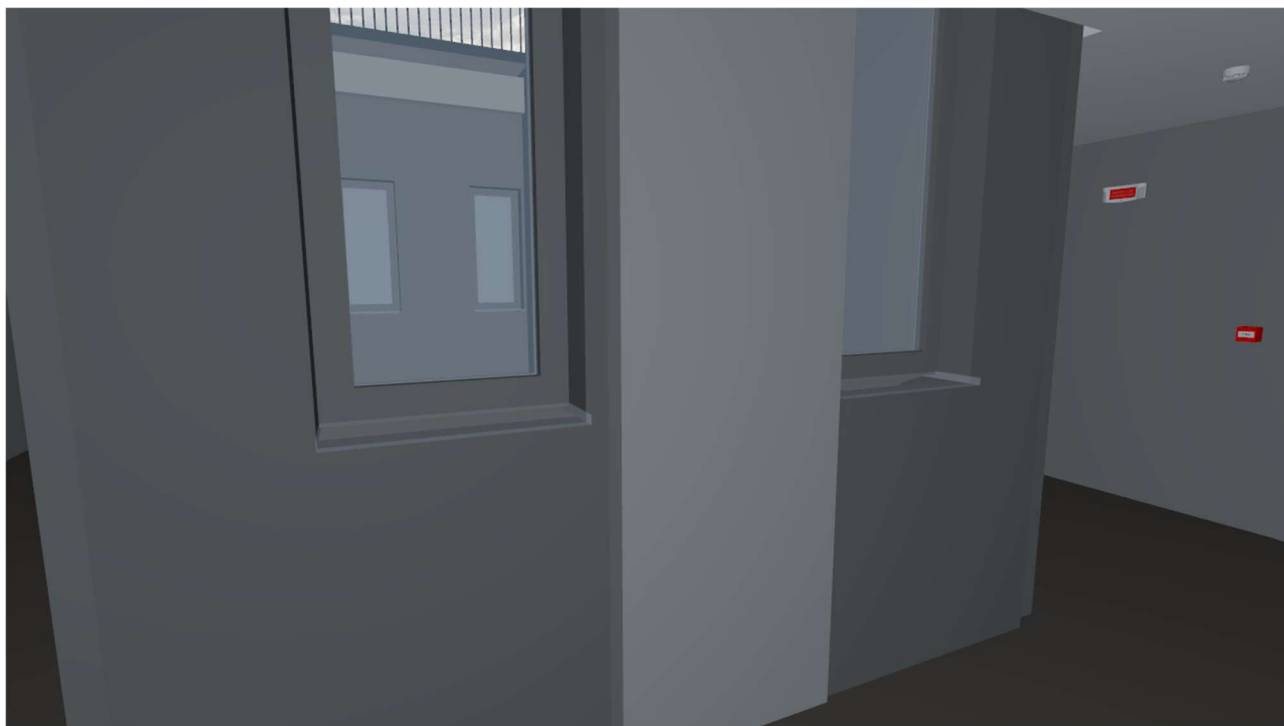


Figura 72 - Immagine catturata nell'ambiente virtuale di VRex dell'Interferenza 01 del reparto di degenza



Figura 71 - Localizzazione dell'interferenza 01 all'interno del reparto di degenza del P5

La correzione di questo problema è stata effettuata principalmente attraverso operazioni di modellazione mirate all'interno del file architettonico che hanno permesso

di introdurre le aperture mancanti nelle partizioni pertinenti. Ogni segmento di parete lungo il perimetro del reparto è stato esaminato e i "vuoti" corrispondenti sono stati inseriti nelle contropareti in modo che corrispondessero alla posizione e alle dimensioni delle finestre definite nel modello di facciata. Dopo la conclusione di queste modifiche, il modello architettonico e quello di facciata sono stati nuovamente sovrapposti all'interno dell'ambiente BIM per verificare l'allineamento geometrico tra gli elementi. In questa fase i progettisti sono stati in grado di verificare che le aperture fossero in corrispondenza delle finestre della facciata e che la configurazione spaziale rispettasse le dimensioni e gli spazi liberi richiesti. Il processo ha anche garantito la piena coordinazione dei pannelli della facciata dei telai delle finestre e delle partizioni interne. Una volta ultimate le correzioni, i modelli sono stati esportati e ricaricati nell'ambiente VR immersivo. Poi la seconda ispezione in VRex ha reso possibile la valutazione del risultato a grandezza naturale, accertando che le condizioni di luce naturale in ingresso fossero coerenti con gli obiettivi progettuali e che le aperture producessero l'effetto spaziale desiderato.

Le correzioni apportate sono state fondamentali anche per quanto riguarda la normativa e l'ambiente, in particolare per il calcolo del Rapporto Aeroilluminante (RAI). Questo parametro misura il rapporto tra la superficie calpestabile di un ambiente e la superficie totale vetrata o areante delle sue finestre. La normativa edilizia italiana attualmente impone che il rapporto minimo tra la superficie apribile delle finestre e la superficie calpestabile dell'ambiente debba essere di almeno $1/8$ (Ministero della sanità, 1975). Questo dato garantisce un livello di illuminazione soddisfacente e un adeguato livello di ventilazione naturale negli spazi abitati. In ambienti sanitari come i reparti ospedalieri, questo vincolo è particolarmente importante poiché la luce naturale e il ricambio d'aria contribuiscono non solo al benessere dei pazienti, ma anche al comfort del personale e alla qualità ambientale complessiva. Per verificare che questo requisito sia rispettato, i dati necessari sono stati estratti dal modello architettonico di Revit. Le superfici dei locali e le relative superfici finestrate sono state calcolate usando le informazioni integrate negli elementi del BIM. Per questo erano essenziale delle aperture correttamente modellate nelle controparti. L'assenza di questi elementi avrebbe reso incompleto o impreciso il calcolo della superficie vetrata associata a ciascun ambiente. La correzione del modello ha consentito perciò al team di progettazione sia di risolvere l'incoerenza geometrica, sia di eseguire la verifica del rapporto di luce diurna richiesta usando dati BIM affidabili.

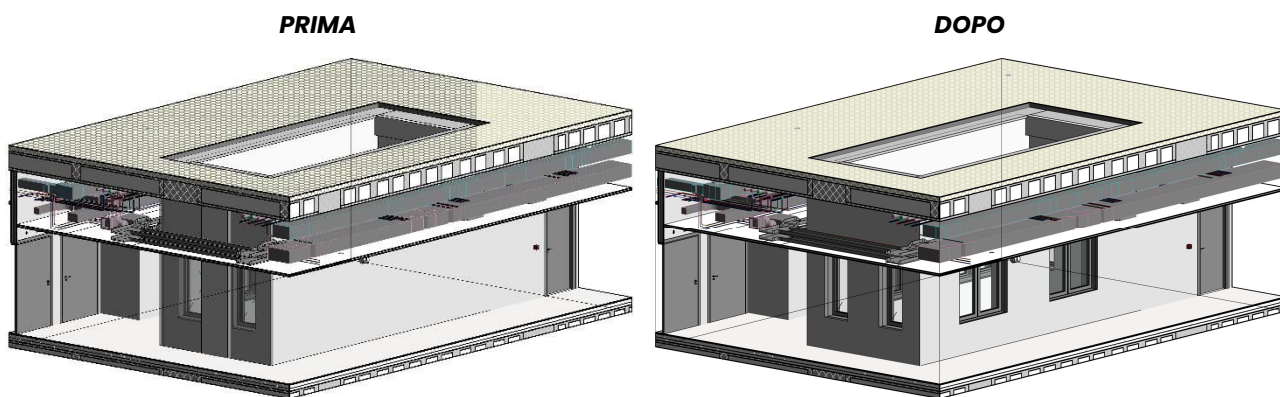


Figura 73 - Viste 3D prima e dopo la correzione dell'interferenza 01 (degenze)

02. Assenza porte di servizio nei connettivi

Il problema successivo, individuato durante l'ispezione immersiva, riguarda l'assenza di diverse porte di servizio nei corridoi di collegamento del reparto di degenza. Esse sono elementi essenziali che consentono il passaggio tra le diverse aree funzionali del reparto e svolgono un ruolo cruciale nella strategia di sicurezza antincendio degli edifici ospedalieri. Il problema è stato rilevato durante la navigazione del modello nell'ambiente VRex, dove sono emerse tre aperture mancanti in un segmento di corridoio situato in prossimità di uno dei nuclei di circolazione verticale del piano, in particolare il blocco contenente scale e ascensori sul lato destro del reparto.



Figura 74 - Immagine catturata nell'ambiente virtuale di VRex dell'Interferenza 02 del reparto di degenza

Nel caso preso in esame, l'assenza delle porte è diventata evidente durante l'esplorazione immersiva del modello. In VRex è possibile attraversare muri ed elementi architettonici, il che consente all'utente di ispezionare aree che appaiono inaccessibili nella geometria modellata. Attraversando i segmenti di muro dove avrebbero dovuto essere posizionate le aperture, è diventato chiaro che i corridoi continuavano sul lato opposto, confermando che la partizione avrebbe dovuto contenere delle porte di collegamento tra le aree. Ciò ha rivelato che la parete era stata modellata senza le aperture richiesta, probabilmente a causa delle molteplici revisioni del layout che hanno interessato questa porzione di reparto durante la progettazione dei compartimenti antincendio.

Le porte mancanti erano tre, una delle quali avrebbe dovuto essere situata nella parte più a sud, verso gli ascensori riservati ai visitatori e agli utenti esterni, mentre le altre due più verso nord, nel connettivo che arriva dal blocco scale della logistica e del personale sanitario. La prima situazione si verifica in corrispondenza di un'area di attesa che altrimenti rimarrebbe inaccessibile, poiché il corridoio che vi conduce è separato da una parete continua. Considerata l'importanza di mantenere la strategia di compartimentazione antincendio, la soluzione scelta è stata quella di introdurre una porta tagliafuoco a due ante classificata REI 190 con dimensioni 180 × 210 cm, dotata di maniglione antipánico. La designazione REI si riferisce alla classificazione di resistenza al fuoco dell'elemento: R (resistenza) indica la stabilità strutturale dell'elemento esposto al fuoco, E (integrità) si riferisce alla capacità di impedire il passaggio di fiamme e gas, mentre I (isolamento) è la capacità di limitare la trasmissione del calore al lato non esposto. Una porta classificata REI 190 garantisce quindi una resistenza al fuoco di circa 190 minuti, mantenendo la sua integrità e le sue proprietà isolanti durante tale periodo. L'inclusione di maniglioni antipánico garantisce una rapida apertura in condizioni di emergenza, consentendo agli occupanti di attraversare il corridoio in sicurezza anche in condizioni di stress.

La seconda situazione critica riguarda il corridoio che collega il vano scale più a nord con le aree di degenza. Nella configurazione sbagliata, questo passaggio era interrotto da due pareti senza aperture, impedendo l'accesso diretto tra la spina di circolazione e il reparto a cui è destinata. Poiché quest'area è soggetta a frequenti spostamenti di personale, pazienti e attrezzature, una soluzione basata su porte a battente convenzionali avrebbe creato conflitti spaziali a causa dello spazio limitato tra le due aperture. Per risolvere questo problema, è stato deciso di introdurre due porte scorrevoli,

PRIMA

CASO 2

CASO 1

DOPO

CASO 2

CASO 1

177

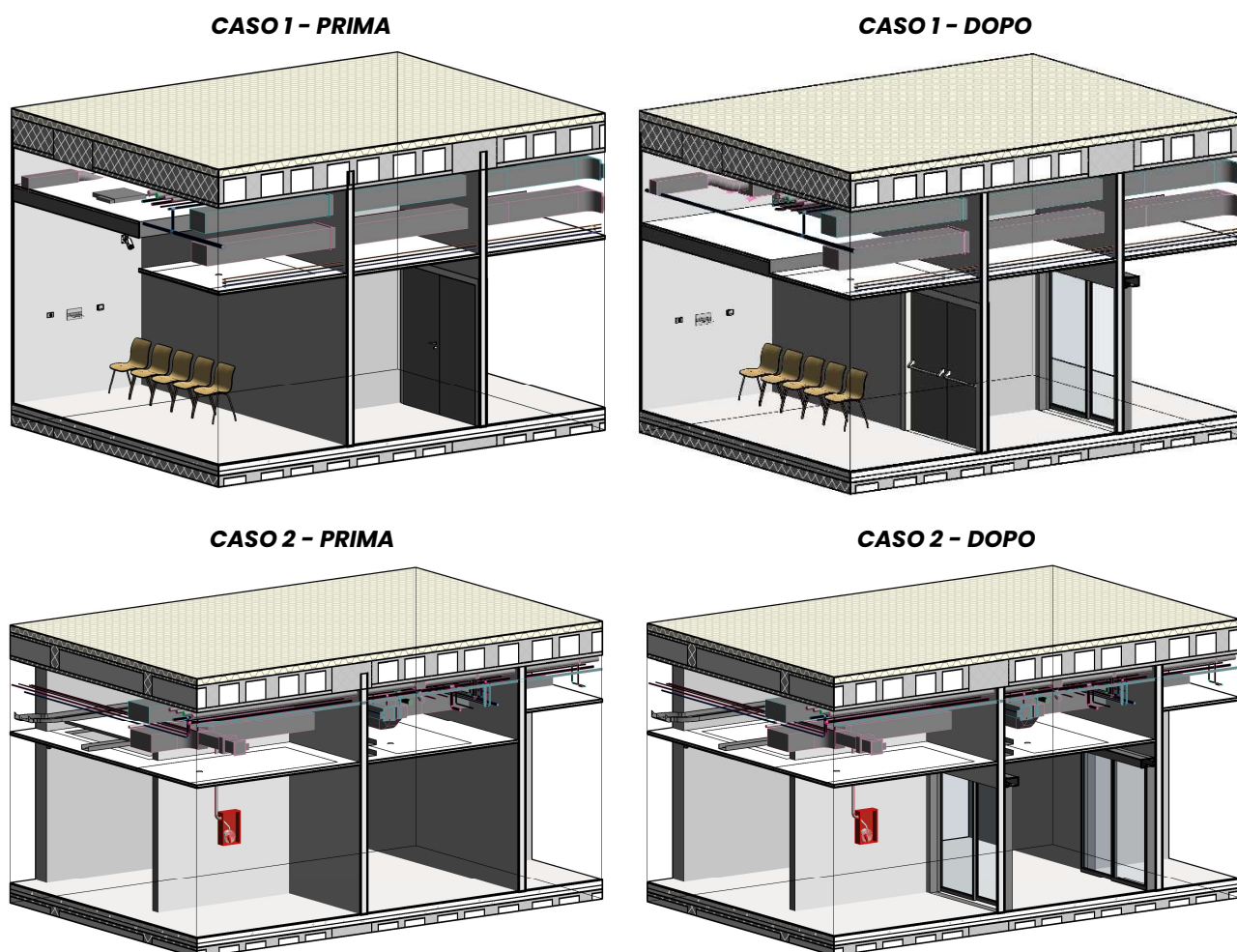


Figura 77 – Viste 3D prima e dopo la correzione dell'interferenza 02 (degenze)

L'individuazione di questo problema evidenzia ancora una volta l'utilità dell'esplorazione immersiva dei modelli. In una tradizionale revisione basata su planimetrie, l'assenza di porte in una rete di corridoi complessa può facilmente passare inosservata. L'ambiente VR consente all'utente di sperimentare direttamente il sistema di circolazione, rendendo immediatamente evidente quando un passaggio è bloccato o quando manca una connessione tra gli spazi. Questa consapevolezza spaziale si è rivelata fondamentale per identificare gli elementi mancanti e definire soluzioni correttive appropriate, coerenti sia con la funzionalità architettonica che con i requisiti di sicurezza antincendio.

03. ARC – MEP: interferenza tra controsoffitti e impianti

La terza interferenza analizzata riguarda un problema di coordinamento ARC-MEP relativo ai controsoffitti e agli impianti tecnici. Il problema è stato individuato in diverse aree di collegamento dove i corridoi di circolazione si intersecano con piccoli spazi di

lavoro utilizzati dal personale infermieristico. Queste aree ospitano scrivanie, unità di stoccaggio e stazioni di tubi pneumatici, formando sezioni operative integrate nel sistema di connettivi. In particolare, i sistemi di tubi pneumatici sono ampiamente utilizzati negli ospedali per trasportare rapidamente piccoli oggetti tra i reparti. Capsule contenenti campioni di laboratorio, documenti, farmaci o altri materiali leggeri vengono inserite in contenitori sigillati e movimentate attraverso una rete di tubi pressurizzati che collegano diverse aree dell'edificio. Questo sistema consente una rapida logistica interna senza dover ricorrere al trasporto manuale e riduce i tempi necessari per spostare i materiali tra reparti, laboratori e farmacie. Per questo motivo, le stazioni che ricevono e inviano questi contenitori sono spesso collocate in posizioni strategiche all'interno del reparto, in genere vicino alle postazioni di lavoro infermieristiche, dove il personale può accedervi facilmente.

Le aree circostanti queste stazioni non sono semplici spazi di passaggio. Funzionano come veri e propri ambienti di lavoro per gli infermieri e il personale, dove vengono svolte attività amministrative, gestite le informazioni sui pazienti e avviene la comunicazione con i visitatori o con altre unità ospedaliere. Essendo classificati come luoghi di lavoro, questi spazi devono rispettare requisiti dimensionali minimi. In particolare, la normativa italiana in materia di edilizia e luoghi di lavoro stabilisce che gli ambienti di lavoro debbano avere un'altezza libera minima di circa 3,0 metri. Una condizione diversa si applica ai corridoi di collegamento del reparto. Queste aree ospitano una fitta rete di impianti tecnici che distribuiscono i servizi al piano. Le condutture meccaniche principali, le canaline portacavi elettriche e le tubazioni sanitarie sono in genere disposte sopra i corridoi prima di diramarsi in linee di distribuzione più piccole che alimentano le stanze adiacenti. Per fornire spazio sufficiente a queste installazioni, i corridoi sono stati progettati con un controsoffitto alto circa 2,5 metri, lasciando un vuoto tecnico accessibile al di sopra di esso. Di conseguenza, spazi adiacenti sono caratterizzati da diverse tipologie e altezze di controsoffitto. Nelle postazioni di lavoro infermieristiche, il controsoffitto è composto da pannelli radianti metallici, integrati con appositi dispositivi impiantistici per garantire un adeguato comfort termico nelle aree in cui il personale rimane per periodi di tempo prolungati. Questi sistemi contribuiscono a mantenere stabili le condizioni interne nelle zone di lavoro. Al contrario, i controsoffitti installati nei corridoi di collegamento sono costituiti da pannelli metallici a doghe. Questo tipo di finitura è stato scelto per ragioni sia estetiche che funzionali: il motivo lineare aumenta

la percezione di continuità lungo il corridoio, mentre gli elementi rimovibili consentono una facile ispezione degli impianti tecnici situati al di sopra.

La coesistenza di questi due sistemi genera inevitabilmente discontinuità di altezza all'interfaccia tra aree contigue. Quando un controsoffitto più basso del corridoio ne incontra uno più alto in un'area di lavoro o segreteria, si crea uno spazio verticale tra i due livelli. Se questo spazio non è adeguatamente chiuso, gli impianti tecnici che corrono sopra i controsoffitti rimangono in parte visibili. Per risolvere questa condizione, tipicamente vengono introdotti piccoli elementi verticali in cartongesso, comunemente chiamati paratie o "velette", che sigillano visivamente la transizione tra i soffitti a diverse altezze.

L'analisi immersiva ha rivelato che in diversi punti del reparto di degenza questi elementi non erano stati modellati o installati. In particolare, l'ispezione condotta in VR attorno a una delle postazioni di lavoro infermieristiche ha mostrato che la transizione tra il soffitto del corridoio e quello della postazione di lavoro rimaneva aperta, esponendo gli impianti tecnici sovrastanti. Dal punto di vista dell'utente all'interno dell'ambiente virtuale, l'assenza di questi elementi di finitura rendeva chiaramente visibili condotti, tubazioni e canaline portacavi, evidenziando l'incompleta definizione architettonica dell'interfaccia del controsoffitto.



Figura 78 - Immagine catturata nell'ambiente virtuale di VRex dell'Interferenza 03 del reparto di degenza



Figura 79 - Localizzazione dell'interferenza 03 all'interno del reparto di degenza del P5

L'ispezione in VR ha evidenziato anche ulteriori problemi di coordinamento tra i controsoffitti e gli impianti dell'edificio. Poiché i principali percorsi tecnici passano sopra i corridoi, lo spazio disponibile è ampiamente occupato da impianti di notevoli dimensioni. In alcuni punti, condotti, tubazioni e impianti elettrici si intersecavano con i componenti architettonici del controsoffitto, producendo sovrapposizioni e conflitti locali tra gli elementi MEP e la geometria del controsoffitto.

Questo tipo di problema illustra il delicato equilibrio richiesto tra progettazione architettonica e infrastrutture tecniche negli edifici ospedalieri. I corridoi si configurano spesso come principali percorsi di distribuzione per i servizi dell'edificio, fungendo allo stesso tempo da importanti spazi di circolazione e orientamento per pazienti e personale. Assicurarsi che il sistema di controsoffitto soddisfi sia i requisiti spaziali dell'architettura sia le dimensioni fisiche degli impianti tecnici è quindi essenziale per ottenere un progetto coordinato e realizzabile.

La risoluzione di queste problematiche ha richiesto un intervento coordinato tra il progetto architettonico e quello impiantistico, a partire dalla correzione della configurazione dei controsoffitti all'interno del modello architettonico. Il primo passo è consistito nella revisione della geometria dei controsoffitti e delle zone di transizione tra

spazi con altezze diverse. Gli elementi architettonici sono stati adattati per ripristinare la configurazione prevista, assicurandosi che i controsoffitti riflettessero correttamente la logica progettuale degli spazi e che le velette mancanti fossero inserite dove necessario per colmare le fessure verticali. In questa fase, particolare attenzione è stata posta alla verifica del rispetto dei requisiti minimi di altezza per gli spazi abitativi e lavorativi. Le aree utilizzate dal personale sanitario sono state verificate per confermare che l'interpiano interno netto rimanesse coerente con gli standard normativi, mentre i corridoi di collegamento hanno mantenuto il livello di soffitto inferiore necessario per ospitare gli impianti tecnici soprastanti. Allo stesso tempo, la tipologia delle finiture del controsoffitto è stata rivista per garantirne la coerenza con la destinazione d'uso degli spazi.

Dopo aver corretto la configurazione architettonica, gli impianti MEP sono stati revisionati e adattati di conseguenza. Diversi condotti e tubazioni intersecavano la geometria del soffitto o occupavano volumi non compatibili con la nuova configurazione architettonica. Questi componenti sono stati dunque riposizionati e reindirizzati all'interno dello spazio tecnico a disposizione, modificando l'allineamento e la quota degli impianti in modo che non interferissero tra loro o con i soffitti. Adattando il percorso impiantistico alla corretta configurazione architettonica, le interferenze tra gli elementi tecnici e i pannelli del controsoffitto sono state progressivamente eliminate.

Grazie a questo processo, i controsoffitti hanno riacquisito il loro ruolo originario sia come elementi di finitura architettonica che come strati accessibili che nascondono l'infrastruttura tecnica, mentre le reti meccaniche e di servizio sono state riorganizzate all'interno dello spazio disponibile, senza compromettere i requisiti funzionali del reparto.

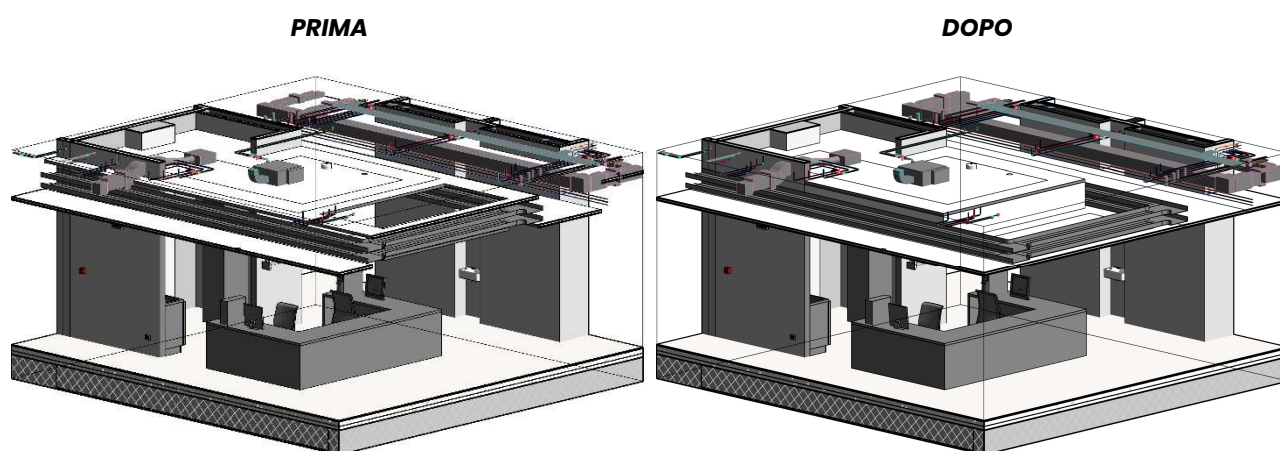


Figura 80 - Viste 3D prima e dopo la correzione dell'interferenza 03 (degenze)

3.2. Presentazione immersiva del progetto

3.2.1. Metodologia e risultati della presentazione tramite VR

Dopo l'identificazione e la correzione delle problematiche di progettazione, coordinamento e modellazione, i modelli BIM coordinati hanno raggiunto una fase idonea alla valutazione esperienziale. Una volta risolte le principali incongruenze geometriche e i conflitti interdisciplinari, il materiale digitale non rappresenta più solo uno strumento di coordinamento tecnico, ma diventa una rappresentazione spaziale affidabile degli ambienti ospedalieri proposti. In questa fase, l'attenzione della ricerca si sposta dalla risoluzione delle discrepanze di modellazione alla verifica delle qualità spaziali e funzionali del progetto.

Per supportare questa transizione, i modelli BIM coordinati sono stati trasformati in ambienti virtuali interattivi attraverso il flusso di lavoro descritto nel Capitolo 2. Gli ambienti esportati sono stati implementati all'interno della piattaforma di sviluppo Unity e configurati per consentire l'esplorazione immersiva e l'interazione attraverso tecnologie di realtà virtuale. Piuttosto che avere il solo scopo della visualizzazione, queste scene sono state programmate come spazi di simulazione dinamici in cui le soluzioni architettoniche progettate possono essere sperimentate ed eventualmente riconfigurate a grandezza naturale. L'uso della realtà virtuale introduce una modalità di coinvolgimento nel progetto diversa rispetto ai metodi di rappresentazione convenzionali. Nonostante disegni, rendering e modelli tridimensionali standard forniscano importanti informazioni descrittive, spesso richiedono agli utenti di interpretare le relazioni spaziali indirettamente. Gli ambienti immersivi, invece, consentono agli osservatori di percepire proporzioni, distanze e configurazioni spaziali direttamente attraverso l'interazione con lo spazio a grandezza reale. Questo passaggio dall'osservazione rappresentativa all'esplorazione esperienziale consente di valutare il progetto dal punto di vista dei suoi futuri utenti.

Gli ambienti virtuali sviluppati per questa ricerca sono stati utilizzati come piattaforme per la revisione del progetto e la convalida spaziale. Attraverso l'esplorazione diretta e l'interazione con gli elementi della scena, è stato possibile osservare il comportamento delle configurazioni proposte quando sperimentate su scala reale. Oltre all'osservazione passiva, il sistema ha consentito anche la manipolazione attiva di elementi selezionati,

consentendo agli utenti di testare disposizioni spaziali alternative e verificarne l'impatto sulla funzionalità degli spazi.

La rappresentazione immersiva dell'interfaccia virtuale è stata progettata per riprodurre l'esperienza spaziale del progetto il più fedelmente possibile, mantenendo al contempo i vincoli operativi necessari per il rendering in tempo reale. L'attenzione principale è stata quindi rivolta alle proprietà visive delle scene e alla configurazione dei movimenti fisici dell'utente e delle azioni corrispondenti all'interno dello spazio digitale. L'obiettivo non era semplicemente quello di visualizzare il modello dell'ospedale, ma piuttosto di consentirne la percezione come uno spazio abitabile le cui proporzioni, distanze ed elementi potessero essere percepiti in modo paragonabile all'osservazione del mondo reale. Per raggiungere questo obiettivo, le scene virtuali sono state programmate in modo che il punto di vista dell'utente corrisponda direttamente alla posizione del visore. L'orientamento della visuale cambia continuamente in base alla rotazione naturale della testa dell'utente, consentendo l'osservazione dell'ambiente semplicemente guardandosi intorno. I movimenti orizzontali e verticali non vengono quindi simulati artificialmente, ma seguono il comportamento fisico della persona che indossa il visore. Anche l'altezza percepita del punto di vista viene calibrata automaticamente. All'inizializzazione del sistema, viene rilevata la posizione del piano del pavimento e l'altezza della telecamera viene regolata in base alla postura reale dell'utente. Questo allineamento garantisce che pareti, mobili e apparecchiature mediche siano percepiti alla scala corretta e da una prospettiva realistica, rafforzando il senso di coerenza spaziale tra l'ambiente fisico e quello virtuale.

Gli spostamenti all'interno dello spazio simulato si basano su una combinazione di orientamento della testa e input basati sui controller. Mentre la direzione di osservazione è determinata dal movimento del visore, la navigazione nell'ambiente viene eseguita tramite i controller palmari, che consentono all'utente di muoversi attraverso stanze e corridoi senza interrompere la continuità dell'esperienza immersiva. Il movimento risultante è generalmente percepito come fluido e intuitivo, pur rimanendo vincolato dai limiti dell'interfaccia hardware e dalla necessità di evitare disorientamento. In questa configurazione, il sistema cerca di bilanciare la libertà di esplorazione con i vincoli necessari a mantenere la stabilità spaziale durante la simulazione.

L'interazione con gli elementi contenuti nelle scene è mediata dai controller VR, rappresentati nell'ambiente virtuale attraverso modelli di mani articolate. Questi modelli rispondono dinamicamente all'input dell'utente e replicano i gesti associati all'afferrare

o manipolare oggetti. Quando i pulsanti corrispondenti sui controller vengono attivati, le mani virtuali si chiudono attorno all'elemento selezionato, consentendo all'utente di raccogliere, spostare o riposizionare gli oggetti all'interno della scena. La loro animazione cambia a seconda del tipo di azione eseguita, producendo diverse configurazioni delle dita e del palmo a seconda che l'utente stia puntando, afferrando o rilasciando un oggetto. Queste impostazioni di comportamento rafforzano la connessione tra le azioni fisiche dell'utente e la loro rappresentazione virtuale, contribuendo alla percezione di un'interazione diretta con l'ambiente.

Nonostante questi criteri impostati per ricreare un'esperienza spaziale convincente, la simulazione rimane inevitabilmente soggetta ai limiti delle tecnologie di rendering in tempo reale. A differenza dei metodi di visualizzazione offline, che consentono il calcolo di effetti di illuminazione e ombreggiatura altamente dettagliati, gli ambienti immersivi devono mantenere sequenze di frame elevate per garantire il comfort visivo ed evitare fastidi legati al movimento. Questo requisito impone limitazioni alla complessità della geometria, al numero di sorgenti luminose e al livello di dettaglio che può essere osservato simultaneamente. Per questa ragione, la configurazione dell'aspetto visivo delle scene ha richiesto un attento equilibrio tra fedeltà grafica ed efficienza computazionale. Le condizioni di illuminazione sono state regolate per ricreare l'atmosfera generale degli interni ospedalieri. Le sorgenti di luce artificiale sono state posizionate e calibrate per produrre un'illuminazione chiara delle superfici e delle attrezzature, garantendo che la disposizione funzionale degli spazi rimanesse facilmente leggibile. Analogamente, le proprietà riflettenti dei materiali assegnati a pareti, pavimenti e oggetti sono state ottimizzate per migliorare il realismo visivo senza introdurre costi di rendering eccessivi.

Sebbene questi ambienti non riescano a riprodurre ogni sfumatura ottica dello spazio fisico, il controllo combinato di illuminazione, materiali e riflessi ha permesso di programmare scene che trasmettono le caratteristiche spaziali essenziali del progetto. Gli ambienti definiti forniscono un contesto visivo sufficientemente realistico per supportare la presentazione e l'interpretazione della proposta architettonica. All'interno di questo ambiente immersivo, gli utenti hanno la possibilità di comprendere le relazioni tra i diversi elementi del progetto, riconoscere l'organizzazione funzionale degli spazi e concentrarsi sugli aspetti più rilevanti per una valutazione coerente e adeguata.

Una volta configurati i parametri visivi e percettivi della visualizzazione virtuale, l'attenzione si è spostata sul modo in cui gli utenti potevano muoversi e interagire con gli

spazi simulati. Le scene sono state quindi strutturate non solo come ricostruzioni visive del modello, ma come ambienti in grado di rispondere in modo coerente alle azioni dell'utente. Questo è stato ottenuto attraverso l'implementazione di script, la regolazione delle impostazioni del motore e l'assegnazione di componenti comportamentali specifici agli oggetti importati nelle scene Unity. Insieme, queste operazioni hanno permesso agli elementi virtuali di mostrare risposte coerenti con la logica fisica prevista in un ambiente reale.

Il primo passo fondamentale è stata la definizione dei confini fisici dello spazio. Elementi architettonici come muri, pavimenti e grandi attrezzature sono stati dotati di componenti di collisione in modo che potessero imitare al meglio veri e propri ostacoli solidi all'interno della simulazione. Quindi, la rappresentazione virtuale dell'utente non può attraversare muri o intersecarsi con oggetti che normalmente ostacolerebbero il movimento nel mondo reale. Questo vincolo gioca un ruolo fondamentale nel mantenimento della credibilità spaziale, poiché impedisce all'esplorazione di violare la logica fisica dell'ambiente e rafforza la percezione di esplorare uno spazio architettonico coerente.

Oltre a questi limiti spaziali, diversi elementi sono stati configurati per rispondere al motore fisico integrato nella piattaforma. Agli oggetti progettati per essere manipolati dall'utente sono state quindi assegnate proprietà che consentono loro di reagire a forze, gravità e accelerazione. Quando un oggetto viene raccolto e rilasciato, si comporta secondo le stesse regole che governano i corpi fisici: cade verso terra se lasciato cadere e segue una traiettoria influenzata dall'intensità e dalla direzione del movimento applicato quando lanciato. In questo modo, le interazioni non avvengono isolatamente, ma rimangono integrate in un quadro fisico coerente che collega le azioni dell'utente a conseguenze visibili nell'ambiente.



Figura 81 – *Diverse tipologie di interazioni con elementi nella scena delle sale operatorie*

Il comportamento di ciascun elemento interattivo non è stato standardizzato, ma adattato individualmente in base al ruolo previsto all'interno dell'ambiente simulato. Strumenti medici, apparecchiature mobili e oggetti più piccoli sono stati configurati per essere afferrati e manipolati con una sola mano, replicando i gesti tipicamente associati al loro utilizzo. Altri elementi, in particolare quelli che normalmente richiederebbero maggiore stabilità o controllo, sono stati configurati per consentire l'interazione simultanea con entrambe le mani virtuali.

Lo spostamento all'interno dell'ambiente virtuale è consentito attraverso due metodi di navigazione, ciascuno progettato per rispondere a esigenze diverse durante l'esplorazione delle scene. La modalità principale si basa sui controlli integrati nei dispositivi portatili collegati al visore. In questa configurazione, il controller sinistro gestisce lo spostamento in avanti e laterale, mentre quello destro controlla la rotazione della visuale. La velocità di movimento è stata deliberatamente impostata per approssimare un passo moderato, garantendo che gli utenti possano esaminare la configurazione spaziale degli ambienti senza subire bruschi o disorientanti cambiamenti di posizione. Oltre a questo sistema di movimento continuo è stato introdotto un secondo metodo di locomozione: il teletrasporto. Attraverso questo meccanismo l'utente può puntare a una posizione specifica all'interno della scena e riposizionarsi istantaneamente in quel punto. Il teletrasporto offre un'alternativa pratica per coprire distanze maggiori all'interno dell'ambiente virtuale o per raggiungere rapidamente punti di osservazione specifici senza dover percorrere l'intero percorso tra di essi. Inoltre, questo sistema è ottimale per ridurre il rischio di disagio e nausea dovuti al movimento che può verificarsi durante l'uso prolungato di controlli di navigazione continua.



Figura 82 – Visualizzazione del puntatore per il teletrasporto all'interno dell'ambiente virtuale

Insieme, le strategie di navigazione e interazione adottate definiscono il modo in cui gli ambienti possono essere esplorati durante l'esperienza immersiva. L'utente non è limitato a osservare lo spazio architettonico da punti di vista fissi; è invece libero di muoversi attraverso le stanze, avvicinarsi ai singoli elementi, manipolare oggetti selezionati e osservare come i diversi componenti del progetto si relazionano tra loro. Questa combinazione di movimento spaziale, interazione fisica e vincoli ambientali trasforma le scene da rappresentazioni statiche in ambientazioni interattive in cui le soluzioni architettoniche proposte possono essere esaminate da molteplici prospettive.

Grazie alla piattaforma sviluppata, lo stesso ambiente ospedaliero può essere esplorato da punti di vista notevolmente diversi, a seconda di chi lo naviga. Le impostazioni scelte consentono agli utenti di muoversi negli spazi in modi che evidenziano gli aspetti più rilevanti per il loro ruolo, rivelando come un singolo progetto possa essere vissuto in modi molteplici, a volte inaspettati. Un medico, ad esempio, può concentrarsi sulle aree operatorie: la disposizione degli spazi chirurgici, l'accessibilità degli strumenti durante le procedure e la chiarezza dei percorsi di circolazione per le aree pulite, sporche e di emergenza. Queste osservazioni aiutano a valutare se l'organizzazione spaziale supporti realmente l'efficienza clinica e la sicurezza. Il personale infermieristico affronta l'ambiente con priorità diverse. Può verificare lo spazio di manovra necessario per letti e barelle, valutare la visibilità dalle proprie postazioni di lavoro e controllare se le aree che deve supervisionare rimangono visibili. Allo stesso tempo, può fornire feedback pratici sulle scrivanie, sulle sale di preparazione per le attività pre e post operatorie o sui bagni assistiti, luoghi in cui si svolgono le attività quotidiane. I pazienti, d'altra parte, percepiscono il reparto attraverso una lente più esperienziale. Possono esplorare l'atmosfera del reparto di degenza, esaminare la vista dal letto o osservare cosa appare oltre la finestra. Le loro impressioni possono portare a suggerimenti su modifiche alla disposizione, proporzioni delle stanze o arredi che potrebbero favorire al meglio il comfort e il recupero.

Nel loro insieme, questi riscontri promuovono un processo di progettazione partecipata in cui i futuri utenti degli spazi ospedalieri influenzano attivamente le soluzioni finali. L'ambiente immersivo diventa una piattaforma condivisa in cui progettisti, medici, personale sanitario e pazienti possono osservare la stessa configurazione e discuterne utilizzando un riferimento visivo comune. Invece di affidarsi esclusivamente a disegni, planimetrie o rappresentazioni astratte, le parti interessate interagiscono direttamente con l'ambiente simulato e ne valutano le qualità su scala individuale.



Figura 83 – Visuale di una camera di degenza doppia dal punto di vista di un paziente

Un approccio basato sulla collaborazione tra professionisti e futuri fruitori dell'edificio garantisce un dialogo più informato e consapevole. Il personale medico può evidenziare vincoli operativi che potrebbero non emergere immediatamente dalla documentazione di progettazione tradizionale, mentre i pazienti possono esprimere percezioni relative al comfort, all'orientamento, alla privacy o al benessere psicologico. Le loro osservazioni riguardano spesso aspetti sottili dell'esperienza spaziale, tra cui visibilità, distanza percepita, accessibilità degli elementi o rapporto tra arredi e circolazione, che sono difficili da prevedere durante le fasi di progettazione convenzionali.

Incorporando questi punti di vista fin dalle prime fasi del processo, il team di progettazione può identificare criticità, testare layout alternativi e perfezionare l'organizzazione degli spazi prima dell'inizio della costruzione. Il risultato non è semplicemente un progetto convalidato, ma un design che è stato progressivamente plasmato attraverso il feedback di coloro che utilizzeranno l'edificio. In questo senso, gli ambienti immersivi supportano un quadro decisionale più inclusivo, rafforzando l'allineamento tra soluzioni architettoniche, pratiche sanitarie ed esperienza vissuta negli spazi ospedalieri.

Sulla base di questo quadro partecipativo, la piattaforma sperimentale è stata progettata anche per consentire la modifica spaziale diretta all'interno dell'ambiente

virtuale. Oltre all'osservazione e alla valutazione, gli utenti possono intervenire attivamente nella configurazione degli spazi attraverso un'interfaccia interattiva di modifica del layout sviluppata all'interno di Unity.

L'applicazione è basata su un sistema grafico costruito con elementi Canvas, che funzionano come livelli di interfaccia utente bidimensionali renderizzati nello spazio tridimensionale. Grazie a questa struttura, è possibile interagire con un pannello di controllo mobile sempre all'interno dell'ambiente immersivo che simula l'ospedale. Il pannello si configura come un insieme di comandi che permettono la manipolazione degli oggetti e degli elementi posizionati nella scena, creando una connessione tra l'esplorazione spaziale e l'interazione progettuale. Selezionando un componente, l'interfaccia consente all'utente di modificare tre parametri principali: visibilità, posizione e rotazione. Una combinazione di cursori e pulsanti controlla queste operazioni. Regolando i cursori, l'elemento selezionato può essere traslato o ruotato lungo uno o più dei suoi assi di riferimento locali. Questo meccanismo consente di riposizionare arredi, apparecchiature mediche e componenti architettonici o strutturali con un elevato grado di controllo, visualizzando immediatamente il risultato della modifica. Questa funzione estende l'ambiente immersivo da strumento di visualizzazione a spazio di progettazione operativo. La disposizione delle stanze può essere riorganizzata, le attrezzature possono essere riposizionate e la disposizione degli arredi può essere testata direttamente all'interno dell'ospedale simulato. Poiché queste trasformazioni avvengono in tempo reale, le conseguenze di ogni decisione diventano immediatamente percepibili.



Figura 84 – Interfaccia di modifica e progettazione degli ambienti virtuali

Questa interfaccia rappresenta uno dei risultati più significativi della ricerca. Invece di limitare l'ambiente virtuale all'osservazione passiva, la piattaforma consente la riprogettazione diretta degli spazi durante la sessione immersiva stessa. I team di progettazione possono sperimentare configurazioni alternative mentre sperimentano l'edificio a grandezza naturale, valutandone la circolazione, l'accessibilità e le relazioni spaziali man mano che i cambiamenti si verificano. Allo stesso tempo, il personale sanitario e i potenziali pazienti non sono più limitati a fornire un feedback puramente verbale. Possono suggerire modifiche spaziali concrete, spostare una postazione di lavoro, riorientare un letto o riposizionare un'apparecchiatura, in base alle loro esigenze operative o esperienziali. Architetti e ingegneri possono quindi valutare queste proposte all'interno dello stesso ambiente, perfezionandole in base ai vincoli tecnici, ai requisiti funzionali e agli standard normativi. Il risultato è un flusso di lavoro collaborativo in cui le idee progettuali emergono, si evolvono e vengono testate direttamente all'interno della rappresentazione virtuale dell'ospedale.

La sperimentazione descritta finora evidenzia come gli ambienti immersivi possano ampliare le possibilità tradizionalmente associate alla progettazione. In combinazione con la struttura informativa del BIM, la dimensione virtuale offre un potente supporto per la valutazione del progetto, la discussione interdisciplinare e il processo decisionale durante le prime fasi della pianificazione ospedaliera. Il lavoro svolto in questa ricerca evidenzia anche che la costruzione di tali ambienti è tutt'altro che automatica. La creazione di una scena interattiva, la preparazione dei modelli, l'ottimizzazione della geometria e dei materiali e lo sviluppo di interfacce personalizzate richiedono una notevole quantità di lavoro manuale. Anche quando il flusso di lavoro si dimostra funzionale, nonostante alcune limitazioni nell'interoperabilità e nello scambio di dati tra diverse piattaforme software, il processo complessivo rimane impegnativo in termini di tempo, competenze tecniche e conoscenze di programmazione.

Per questo motivo, l'approccio testato non può essere facilmente esteso alla scala di un intero complesso edilizio, in particolare quando si tratta di grandi strutture sanitarie come il caso studio considerato. La gestione del modello ospedaliero completo all'interno di un'applicazione VR interattiva introdurrebbe significative sfide tecniche legate alle prestazioni, alla complessità del modello e ai tempi di sviluppo. Nell'ambito di questa ricerca, la metodologia si dimostra quindi più efficace se applicata a una scala più mirata: ambienti specifici, sale critiche o tipologie spaziali rappresentative in cui le decisioni progettuali hanno un forte impatto operativo.

Idealmente, gli elementi BIM dovrebbero essere trasferibili in ambienti immersivi attraverso processi molto più automatizzati, riducendo la necessità di una preparazione manuale estesa e di una programmazione personalizzata. Uno strumento in grado di trasformare un modello in un ambiente virtuale navigabile, leggibile tramite un visore e pronto per l'esplorazione, amplierebbe significativamente l'adozione pratica della VR nei flussi di lavoro di progettazione architettonica e sanitaria.

In questo contesto, i capitoli seguenti si concentrano sull'applicazione pratica della metodologia descritta nei due ambienti ospedalieri selezionati come scenari sperimentali per la loro rilevanza operativa e complessità spaziale, ovvero il blocco di sale operatorie e i reparti di degenza. Verranno quindi analizzate in dettaglio le scene interattive sviluppate per questi spazi, esaminandone sia la configurazione sia il riscontro raccolto durante la valutazione immersiva. Attraverso questi casi applicativi, la ricerca indaga come l'approccio proposto possa supportare la valutazione progettuale, l'organizzazione spaziale e la partecipazione degli utenti in due delle aree funzionali più critiche di un edificio ospedaliero.

3.2.2. Scena interattiva sale operatorie

Il flusso di lavoro metodologico sviluppato è stato applicato a una porzione specifica del reparto chirurgico, situata al primo piano dell'ospedale. Aniché tentare di riprodurre l'intero edificio, la ricerca si è concentrata su un frammento rappresentativo del blocco operatorio, selezionato per la sua complessità funzionale e per la varietà di attività che si svolgono all'interno di un sistema spaziale relativamente compatto.

Questa porzione del reparto comprende sia ambienti clinici altamente specializzati sia spazi di supporto che consentono lo svolgimento sicuro ed efficiente delle procedure chirurgiche. All'interno della piattaforma immersiva, gli utenti possono navigare liberamente nell'area corrispondente a questa sezione dell'ospedale. L'ambiente virtuale riproduce una sequenza di stanze interconnesse che rispecchiano la logica operativa di un reparto chirurgico contemporaneo. Tra questi spazi si trova l'area dedicata allo stoccaggio temporaneo dei tavoli operatori igienizzati, situata in prossimità dello spazio in cui i tavoli vengono ricondizionati dopo l'uso. Tale ambiente è accessibile attraverso una zona di filtro controllata, che riflette la separazione igienica e procedurale richiesta tra le diverse fasi di gestione delle attrezzature chirurgiche. Adiacenti a queste aree si trovano le sale dedicate ai processi di lavaggio, confezionamento e sterilizzazione, che svolgono un ruolo cruciale nel mantenimento della sterilità della catena di fornitura degli

strumenti chirurgici. L'ambiente VR include anche le aree di lavaggio chirurgico, dove il personale medico esegue il lavaggio preoperatorio delle mani prima di accedere alle sale operatorie. Questi spazi costituiscono la soglia tra le zone di preparazione e le sale operatorie sterili vere e proprie.

Il nucleo centrale della scena è composto da diverse sale operatorie progettate per diverse esigenze cliniche. Tra queste, una sala operatoria d'emergenza, una sala d'emergenza ortopedica associata alla sala gessi e una sala operatoria ibrida attrezzata per supportare procedure che richiedono tecnologie di imaging⁴⁵ avanzate. Ogni sala chirurgica è collegata al sistema di circolazione circostante tramite punti di accesso controllati, rafforzando la separazione tra aree sterili, zone di supporto tecnico e percorsi di circolazione del personale.

Oltre ai veri e propri spazi operatori, l'area navigabile comprende la sala di controllo che supervisiona le attività chirurgiche, il corridoio di connessione che collega le varie sale del reparto e diverse strutture di supporto al personale. Gli spogliatoi del personale con i rispettivi servizi igienici sono accessibili all'interno della simulazione, insieme a diversi spazi di stoccaggio per materiali puliti e contaminati. Sono inclusi anche depositi e magazzini dedicati per strumenti, attrezzature e dispositivi protesici. Il flusso di lavoro operativo dell'unità chirurgica è ulteriormente supportato dall'area di preparazione e dallo spazio di lavoro infermieristico, che ospita la stazione di tubi pneumatici utilizzata per il rapido trasferimento di materiali e documentazione in tutto l'ospedale. Questo nodo rappresenta un punto di coordinamento chiave all'interno del reparto, collegando le attività cliniche con l'infrastruttura logistica più ampia della struttura sanitaria.

La scelta di questa specifica porzione del blocco operatorio non è stata casuale. Pur rappresentando solo una parte dell'intero reparto, contiene una fitta concentrazione di relazioni funzionali tipiche delle sale operatorie ospedaliere e degli ambienti chirurgici. Aree cliniche, spazi di preparazione sterile, locali tecnici, nodi logistici e servizi per il personale coesistono all'interno di una struttura spaziale attentamente organizzata. Per questo motivo, l'ambiente scelto fornisce un caso efficace attraverso il quale testare e dimostrare il flusso di lavoro BIM-VR, che permette l'analisi e la revisione di questi spazi da diversi punti di vista.

⁴⁵ Le tecnologie di imaging permettono di visualizzare parti interne del corpo in modo non invasivo e sono fondamentali per la diagnosi medica. Tecniche come risonanza magnetica, tomografia computerizzata e ecografia utilizzano diverse forme di energia (magnetica, radiante o acustica) per generare immagini dettagliate degli organi e dei tessuti.



Figura 85 – Planimetria della parte del blocco operatorio presente nella scena interattiva

Navigando in questa scena immersiva, gli utenti possono sperimentare non solo la configurazione architettonica degli spazi, ma anche la logica operativa che ne governa la disposizione. La sequenza delle sale operatorie, la separazione tra flussi puliti e contaminati e la prossimità spaziale tra aree di preparazione e sale operatorie diventano immediatamente comprensibili se esplorate a grandezza naturale. Di conseguenza, questa porzione del blocco operatorio funge da rappresentazione significativa del reparto chirurgico più ampio e, più in generale, della complessità organizzativa che caratterizza gli ambienti ospedalieri contemporanei.

Gli spazi della scena sviluppata sono stati programmati per raggiungere un elevato livello di realismo, sia visivo che funzionale, in modo che l'utente non si limiti a osservare le aree di progetto, ma possa viverle come ambienti clinici attivi. Una delle sale, in particolare, è stata configurata per riprodurre le condizioni di una procedura chirurgica in corso. Al suo interno le lampade operatorie sono posizionate e accese sopra il tavolo operatorio, dove è presente un modello di paziente sottoposto ad anestesia. Attorno al tavolo, la scena include un set dettagliato di attrezzature tipicamente presenti durante un intervento chirurgico: macchine per anestesia, monitor di controllo, display medicali,

sgabelli, sedie, carrelli portastrumenti, aste portaflebo, dispositivi di rianimazione e la gamma di strumenti chirurgici necessari per un'operazione completa. Ognuno di questi elementi è stato importato, posizionato e configurato per comportarsi come un oggetto interattivo all'interno dell'ambiente virtuale. Attraverso i controller VR, l'utente può interagire direttamente con questi componenti. Gli strumenti possono essere prelevati, spostati o riposizionati; le attrezzature possono essere avvicinate ed esaminate da qualsiasi angolazione; l'intera configurazione chirurgica può essere esplorata stando in piedi accanto al tavolo operatorio. Questo livello di interazione trasforma la sala in uno spazio di lavoro simulato piuttosto che in una rappresentazione statica.

Chirurghi e personale clinico possono partecipare al processo di progettazione dei reparti operatori, tuttavia i disegni architettonici, in particolare le planimetrie, non sempre forniscono una comprensione intuitiva dello spazio. Una vista in pianta richiede la capacità di ricostruire mentalmente la configurazione tridimensionale dell'ambiente, di immaginare altezze, distanze e relazioni fisiche tra apparecchiature e persone. Non tutti i professionisti sanitari sono abituati a leggere i disegni tecnici in questo modo, e anche gli utenti esperti potrebbero avere difficoltà a percepire appieno come funzionerà la sala una volta costruita. La simulazione immersiva colma questa lacuna. Entrando nella sala operatoria virtuale, un medico può valutare immediatamente le dimensioni spaziali, la circolazione attorno al tavolo operatorio e il posizionamento delle macchine rispetto al paziente. La presenza stessa del modello del paziente diventa importante, poiché consente all'utente di percepire l'ingombro reale della configurazione chirurgica, incluso lo spazio occupato dal personale medico durante un intervento. Inoltre la possibilità di interagire con gli oggetti rende possibile simulare scenari operativi. Un chirurgo può avvicinarsi al tavolo operatorio, manipolare gli strumenti, verificare se le apparecchiature sono facilmente raggiungibili e controllare se la disposizione delle macchine supporta il flusso di lavoro della procedura. I movimenti che normalmente si verificano durante un intervento chirurgico, come raggiungere uno strumento, riposizionare un carrello, regolare la posizione di un dispositivo, possono essere replicati all'interno della simulazione.

Attraverso questo processo, la valutazione della sala operatoria si sposta da una revisione astratta del progetto a una valutazione esperienziale dello spazio di lavoro. Il personale medico può identificare potenziali problemi relativi all'accessibilità, alla congestione o al posizionamento delle apparecchiature e comunicare le proprie osservazioni direttamente al team di progettazione. In questo modo, il modello

immersivo diventa una piattaforma in cui le competenze cliniche contribuiscono attivamente alla definizione della configurazione spaziale più funzionale della sala operatoria.

Un ulteriore livello di flessibilità è introdotto dall'interfaccia di modifica integrata nella piattaforma. Attraverso il pannello di controllo precedentemente descritto, il personale medico non si limita a osservare la sala operatoria e fornire feedback, ma può modificare attivamente la configurazione dello spazio. L'interfaccia consente agli utenti di regolare aspetti architettonici come le dimensioni della sala, l'altezza libera disponibile o la posizione dei sistemi di illuminazione chirurgica. Allo stesso tempo, il layout interno può essere riconfigurato traslando o ruotando arredi, dispositivi medici e strumenti chirurgici lungo i rispettivi assi di riferimento. Questa funzionalità trasforma l'ambiente immersivo in un banco di prova collaborativo. I chirurghi possono sperimentare layout alternativi, riposizionare le apparecchiature in base alle proprie preferenze operative e verificare immediatamente l'impatto di queste modifiche all'interno dello spazio simulato. I progettisti a loro volta hanno la possibilità di valutare queste proposte, perfezionarle in base ai vincoli tecnici e integrare le soluzioni più efficaci nel progetto.

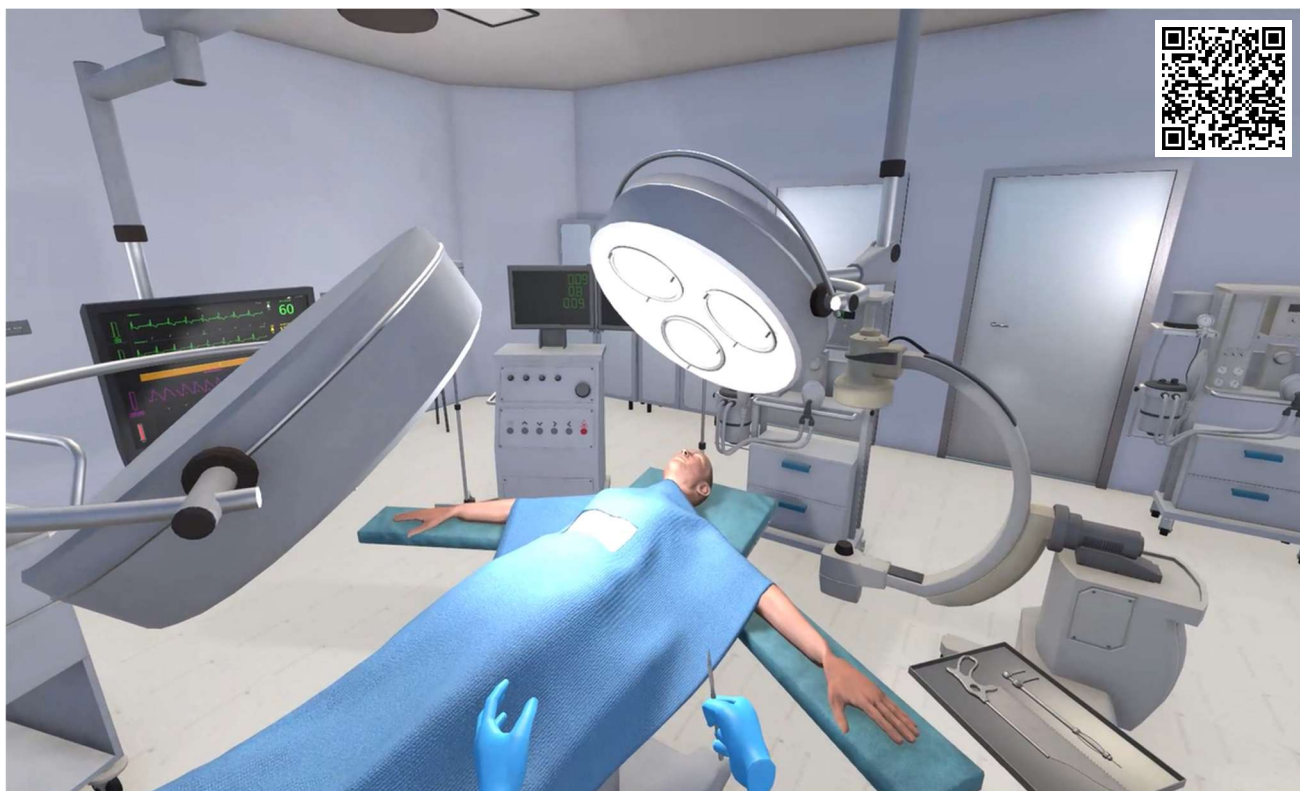


Figura 86 – Vista immersiva in prima persona di un medico con bisturi durante l'esplorazione VR della sala operatoria di emergenza

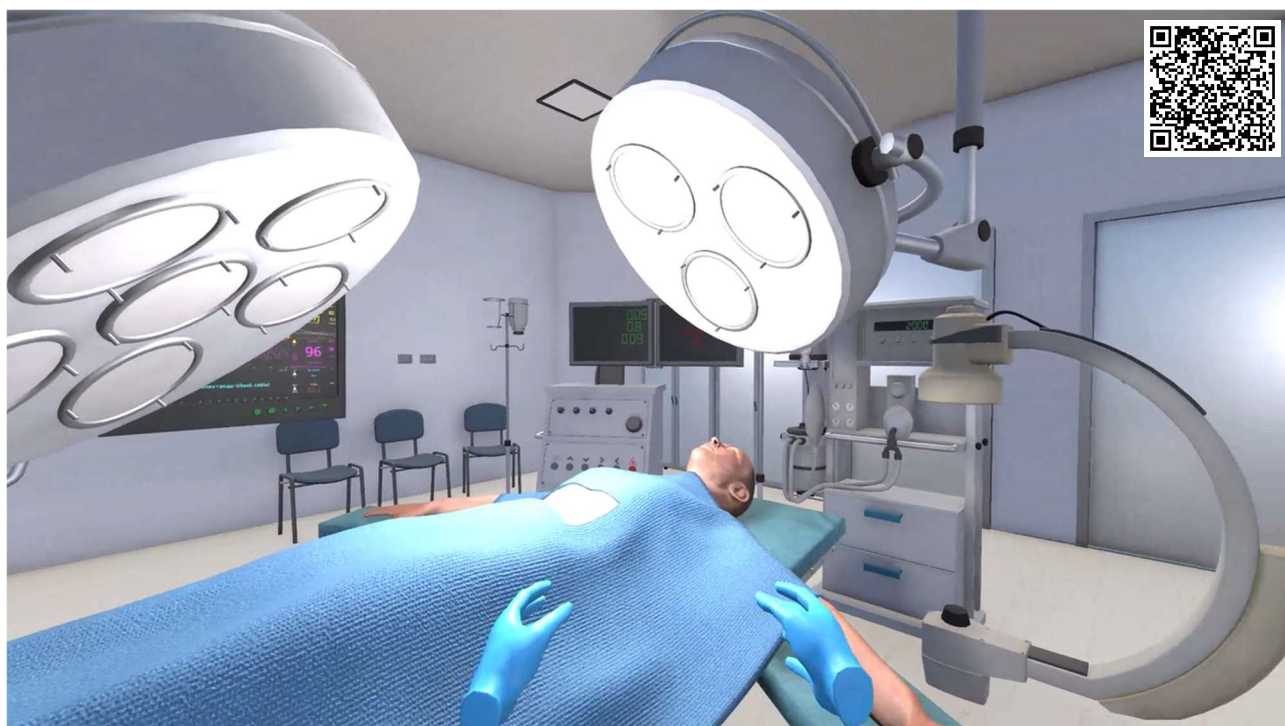


Figura 87 – Vista immersiva in prima persona di un medico seduto e pronto all'intervento durante l'esplorazione VR della sala operatoria di emergenza



Figura 88 – Vista immersiva in prima persona della sala operatoria ibrida dal locale di controllo durante l'esplorazione VR della sala operatoria di emergenza

Un'altra porzione dell'ambiente virtuale si concentra sulla sequenza di spazi dedicati alla preparazione del paziente prima dell'intervento chirurgico. A differenza delle aree osservate principalmente per la valutazione spaziale, questa zona è stata progettata per supportare l'interazione diretta e la simulazione procedurale. L'obiettivo non era solo quello di visualizzare l'ambiente, ma di ricreare, il più fedelmente possibile, le condizioni operative che il personale medico incontrerà nella struttura reale.

La geometria di base degli ambienti deriva dal modello BIM sviluppato in Revit. Arredi, apparecchiature mediche ed elementi aggiuntivi sono stati poi integrati tramite risorse esterne quando necessario, consentendo la ricostruzione di uno spazio che riflette fedelmente la configurazione prevista per la costruzione. Le sale di preparazione, le aree di circolazione e gli accessi alle sale operatorie sono stati quindi riprodotti con il loro set completo di arredi, dispositivi e postazioni di lavoro. È stato inoltre introdotto un modello di paziente di prova per simulare il movimento di una persona sdraiata su un lettino dall'area di preparazione alla sala operatoria.

All'interno della scena, ogni letto d'ospedale è stato programmato come un oggetto interattivo in grado di ospitare un modello di paziente. Questi letti possono essere afferrati con entrambe le mani dall'utente ed essere spostati all'interno del reparto, sia spingendoli che tirandoli, riproducendo i gesti fisici tipicamente eseguiti dal personale sanitario. Questa funzionalità trasforma l'esplorazione del modello in un test dinamico di circolazione all'interno del reparto. Trasportando il letto, e quindi il paziente, lungo i percorsi che collegano sale di preparazione, corridoi e sale operatorie, gli utenti possono verificare se i requisiti spaziali minimi siano effettivamente rispettati. Le distanze tra le porte, la larghezza dei corridoi, i raggi di sterzata e l'accessibilità delle soglie principali possono essere valutati in scala reale. La simulazione diventa particolarmente preziosa quando si immaginano situazioni di forte pressione, come i trasferimenti di emergenza, in cui più operatori potrebbero dover manovrare letti o barelle contemporaneamente. Ciò che appare adeguato in una planimetria bidimensionale può rivelare vincoli inaspettati una volta sperimentati in scala reale con un oggetto in movimento.

Per aumentare ulteriormente il realismo, le porte scorrevoli delle sale operatorie sono state programmate per aprirsi automaticamente tramite un sensore di movimento posizionato nel controsoffitto, replicando il comportamento comunemente adottato nei reparti chirurgici. Quando l'utente si avvicina alla porta mentre trasporta un letto, il sistema si attiva e la porta si apre senza bisogno di interazione manuale. Questo dettaglio gioca un ruolo importante nel verificare se le procedure di trasferimento dei

pazienti possano svolgersi senza intoppi o manovre complicate. Validare le principali sequenze operative è molto importante negli ambienti sanitari. Negli ospedali la circolazione non si limita al movimento autonomo delle persone nei corridoi, spesso comporta anche il trasporto coordinato di pazienti, attrezzature e personale. Un passaggio mal dimensionato, una porta che si apre nella direzione sbagliata o una postazione di lavoro posizionata in un punto critico della circolazione possono generare inefficienze o persino compromettere la sicurezza in caso di emergenza.

Questa sezione della scena include anche le postazioni di lavoro degli infermieri e i relativi arredi. Scrivanie, contenitori, supporti per le attrezzature e postazioni di monitoraggio sono stati disposti secondo il modello di progettazione in modo che il personale possa valutare l'adeguatezza dello spazio di lavoro. Da queste posizioni, gli utenti possono verificare se il controllo visivo delle aree circostanti è efficace e se emergono potenziali punti ciechi lungo i corridoi o in prossimità delle zone di preparazione dei pazienti.

Nel complesso, queste simulazioni contribuiscono a perfezionare il progetto prima dell'inizio della costruzione. L'ambiente immersivo consente a progettisti e operatori sanitari di testare i flussi di lavoro, valutare le relazioni spaziali e anticipare possibili criticità. Il risultato non è solo un layout più funzionale, ma anche un progetto che risponde in modo più efficace ai requisiti operativi e alle considerazioni di sicurezza, un aspetto essenziale in un edificio sensibile e complesso come un ospedale.



Figura 89 - Vista immersiva in prima persona del locale di preparazione pre-intervento



Figura 90 – Visuale dal punto di vista di un infermiere della postazione di lavoro e controllo



Figura 91 – Visuale dal punto di vista di un infermiere del trasporto di un paziente sul lettino verso la sala operatoria

3.2.3. Scena interattiva degenze

Dopo l'esplorazione del blocco chirurgico, il flusso di lavoro BIM-VR è stato applicato a un secondo ambiente ospedaliero caratterizzato da dinamiche spaziali e funzionali molto diverse: il reparto di degenza, situato al quinto piano dell'edificio. Mentre le aree operatorie rappresentano un ambiente altamente specializzato e tecnicamente controllato, le degenze introducono una dimensione più quotidiana della vita ospedaliera, dove le attività cliniche coesistono con periodi più lunghi di permanenza dei pazienti, supervisione del personale e momenti di interazione sociale. Per questo motivo, offre un interessante scenario complementare per testare gli ambienti immersivi nella progettazione sanitaria.

La scena virtuale riproduce una porzione dell'area di degenza e consente agli utenti di muoversi liberamente attraverso gli spazi che scandiscono il funzionamento quotidiano del reparto. L'elemento centrale di questo ambiente è la sequenza di stanze di degenza distribuite lungo il corridoio. Queste stanze includono sia configurazioni con un singolo posto letto che camere doppie, riflettendo le diverse esigenze abitative del reparto. Ogni stanza di degenza è dotata di un proprio bagno ad uso esclusivo, progettato per essere accessibile agli utenti con mobilità ridotta, garantendo che gli standard di accessibilità e le distanze spaziali possano essere valutati all'interno della simulazione immersiva. All'interno del modello immersivo, queste stanze sono arredate con letti ospedalieri, comodini, sedute, supporti per apparecchiature mediche e mobili contenitori. Finestre, sistemi di illuminazione e layout interni sono stati ricostruiti secondo il progetto per fornire una percezione realistica delle proporzioni spaziali e della qualità domestica sempre più ricercata negli ambienti sanitari contemporanei. Attraverso la piattaforma virtuale, gli utenti possono quindi esplorare le stanze non solo dal punto di vista del personale, ma anche da quello di un paziente che occupa lo spazio per periodi prolungati.

Oltre alle stanze di degenza, l'ambiente navigabile include una serie di spazi di supporto essenziali per il funzionamento del reparto. Le postazioni di lavoro infermieristiche e le aree di accoglienza sono posizionate lungo il corridoio, fungendo da hub operativi dove si svolgono le attività di monitoraggio, documentazione e coordinamento dei pazienti. Da questi punti, il personale può supervisionare le aree di circolazione e mantenere il contatto visivo con le stanze vicine. Ulteriori spazi contribuiscono alla quotidianità sia dei pazienti che del personale. Aree di riposo e piccole postazioni di cucina consentono agli

operatori sanitari di prendersi delle pause durante i turni più lunghi, mentre gli uffici amministrativi e le sale di segreteria supportano gli aspetti organizzativi del reparto. Il reparto include anche alcuni ambulatori, che offrono aree per le visite mediche e i colloqui con i pazienti al di fuori delle stanze di degenza. Inoltre, sono presenti spazi ad uso comune destinati agli utenti del piano, come soggiorni condivisi pensati per favorire l'interazione sociale e i momenti di svago durante il ricovero o la permanenza in ospedale. A supporto di questi ambienti, è prevista la presenza di magazzini e aree di servizio per la gestione dei materiali e lo svolgimento delle operazioni infermieristiche e sanitarie. I locali descritti sono interconnessi dal corridoio principale che attraversa il reparto e ne struttura l'organizzazione spaziale.

Questa porzione del reparto è stata scelta per la simulazione poiché consente di esaminare molte delle caratteristiche spaziali e funzionali tipiche dei dipartimenti ospedalieri senza richiedere la ricostruzione dell'intero piano. All'interno di un'area relativamente contenuta, è possibile osservare la coesistenza di spazi privati per i pazienti, aree di lavoro clinico, funzioni amministrative e ambienti condivisi. Questa combinazione rende la parte scelta rappresentativa della logica più ampia che governa l'organizzazione dell'intero reparto di degenza.

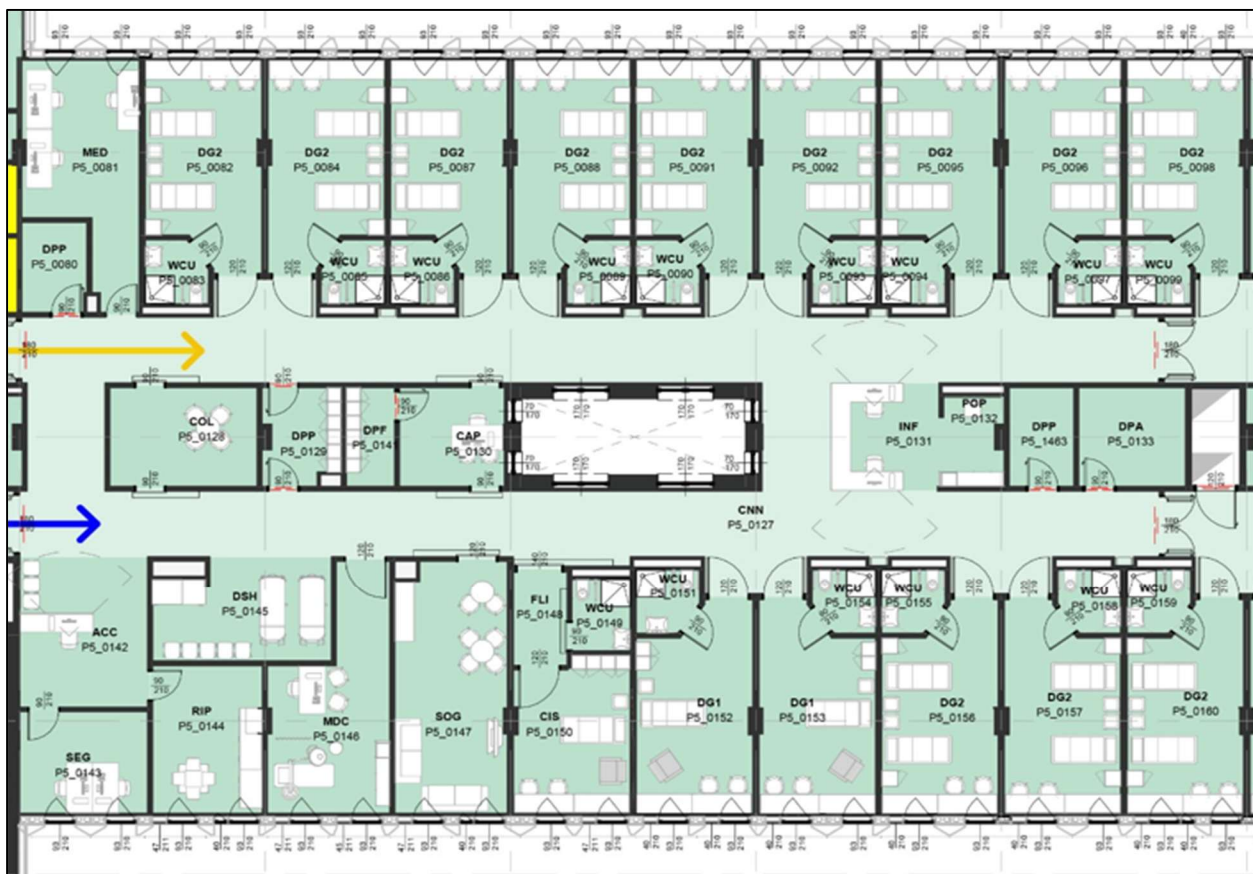


Figura 92 – Planimetria della parte del reparto di degenza presente nella scena interattiva

Attraverso la piattaforma immersiva, gli utenti possono quindi vivere il reparto non semplicemente come un insieme di stanze, ma come un sistema spaziale coerente in cui si intersecano cura, supervisione, privacy e vita quotidiana. Per questo motivo, la scena offre un caso significativo per valutare come la realtà virtuale possa supportare la progettazione e la valutazione di ambienti ospedalieri dedicati al recupero e alla degenza a lungo termine dei pazienti.

Particolare attenzione è stata dedicata alle stanze dei pazienti, programmate per comportarsi come ambienti altamente realistici e completamente interattivi. L'obiettivo non era semplicemente quello di riprodurre la disposizione architettonica, ma piuttosto di ricreare l'atmosfera e la funzionalità di una vera camera d'ospedale dove i degenti possono trascorrere diversi giorni o addirittura settimane. Ogni postazione paziente è organizzata attorno a un letto d'ospedale e al set di elementi che normalmente lo accompagnano. È infatti presente un tavolino mobile montato su ruote, comunemente utilizzato per i pasti, la lettura o le attività personali, rimanendo in posizione sdraiata o seduta. Le apparecchiature mediche necessarie per il monitoraggio e l'assistenza sono posizionate nelle vicinanze, insieme a un'unità a parete dotata di illuminazione integrata e punti di collegamento per gas medicali, elettricità e altri sistemi tecnici necessari sia per le cure di routine che per le situazioni di emergenza. Un televisore è inoltre posizionato a vista del letto, per offrire intrattenimento ai pazienti che potrebbero trascorrere lunghi periodi costretti a letto.

Le tipologie di camere progettate sono principalmente due: singola e doppia. Entrambe le configurazioni prevedono la presenza di ampie finestre che illuminano lo spazio di degenza con luce naturale, corredate da tende per il controllo della privacy. Una scrivania con due sedie è posizionata davanti alla finestra, garantendo uno spazio per scrivere o svolgere attività di lavoro. Nelle stanze singole è presente anche una comoda poltrona a disposizione dei visitatori, consentendo ai familiari di rimanere con il paziente durante le visite. Ogni degenza è collegata a un bagno ad uso riservato, progettato secondo gli standard di accessibilità. I servizi igienici includono i sanitari di base, ovvero lavandino, WC e cabina doccia con piatto a filo pavimento, consentendo alle persone in sedia a rotelle di accedere allo spazio senza barriere. Questa disposizione garantisce che i pazienti con mobilità ridotta possano utilizzare il bagno in modo sicuro e autonomo, se possibile.

L'ambiente immersivo consente di vivere queste stanze in un modo che va ben oltre l'interpretazione di planimetrie o rendering statici. Muovendosi nello spazio, gli utenti

possono percepire le proporzioni reali della stanza, la distanza tra il letto e il bagno e il rapporto tra arredi e aree di circolazione. La posizione del letto rispetto alla finestra diventa immediatamente comprensibile, consentendo agli utenti di valutare la qualità della vista esterna, la quantità di luce naturale che entra nella stanza e il comfort visivo complessivo percepito da una persona sdraiata. Anche le condizioni di luminosità possono essere apprezzate più chiaramente. L'interazione tra l'illuminazione naturale e quella fornita da apparecchi artificiali contribuisce in modo significativo all'atmosfera della stanza, influenzando l'accoglienza e la sensazione di serenità dell'ambiente. Questi aspetti sono particolarmente rilevanti nell'architettura sanitaria, dove la qualità spaziale è sempre più riconosciuta come un fattore in grado di supportare il benessere e il recupero del paziente.

La presenza di elementi interattivi rafforza ulteriormente questo processo di valutazione. Gli utenti possono avvicinarsi al letto, esaminare la disposizione delle apparecchiature, verificare se il bagno è facilmente raggiungibile e manipolare tutti gli oggetti presenti nella scena. Infatti, i letti ospedalieri presenti sono programmati per essere afferrabili con una o due mani e spostati a piacimento, così come tutti gli elementi di contorno che sono stati inseriti per rendere la simulazione più realistica, come bottiglie d'acqua, set di medicine o libri. Queste esperienze aiutano a determinare se la configurazione progettata supporta realmente l'uso quotidiano sia dei pazienti che del personale sanitario.

La possibilità di modificare la scena offerta dalla piattaforma sviluppata permette agli utenti, oltre all'osservazione passiva, anche la sperimentazione partecipata di soluzioni alternative. Tramite l'interfaccia del pannello interattivo, è possibile cambiare il layout architettonico, intervenire sulla disposizione dei dispositivi di illuminazione artificiale o riorganizzare l'arredo e la posizione delle attrezzature mediche. Letti, tavoli, mobili e altri elementi possono essere ruotati o riposizionati per valutare diverse disposizioni e la percezione che ne deriva. Questa possibilità trasforma la stanza di degenza in un ambiente di progettazione partecipata che permette di testare le scelte tecniche e funzionali. Pazienti, operatori sanitari e progettisti possono esplorare lo stesso spazio, discutere le proprie impressioni e modificarne la configurazione direttamente all'interno dell'ambiente immersivo. I riscontri forniti da questa analisi integrata permettono di identificare soluzioni innovative che non si limitano a soddisfare i requisiti normativi, ma contribuiscono a creare ambienti di supporto, rassicuranti e positivi adatti ad accogliere chi deve affrontare un percorso di riabilitazione e guarigione.



Figura 93 – Vista immersiva in prima persona della stanza di degenza singola



Figura 94 – Vista immersiva in prima persona della stanza di degenza doppia



Figura 95 - Vista immersiva in prima persona dei servizi igienici e verifica della loro accessibilità

Oltre alle stanze di degenza, l'ambiente virtuale include anche una serie di spazi complementari che contribuiscono al funzionamento del reparto. Questi ambienti, sebbene diversi per finalità e atmosfera, sono ugualmente importanti nel plasmare l'esperienza complessiva di pazienti, personale e visitatori. La loro inclusione nella scena interattiva permette la valutazione di aree spesso trascurate durante le revisioni progettuali tradizionali, ma che svolgono un ruolo significativo nella vita quotidiana del reparto. Uno di questi spazi è la sala comune dedicata ai pazienti. A differenza delle stanze individuali, essa è progettata per favorire momenti di interazione sociale, relax o semplicemente un cambio di ambiente durante il ricovero. All'interno della scena virtuale, la sala è arredata con sedute, tavoli e luci soffuse che creano un'atmosfera più informale rispetto alle aree cliniche del reparto. L'esplorazione immersiva di questo spazio consente agli utenti di comprendere se le proporzioni, la disposizione e l'arredamento contribuiscono a creare un ambiente confortevole e accogliente per i pazienti che ne usufruiranno. Un altro ambiente incluso nella simulazione è la sala ambulatoriale utilizzata per visite ed esami medici, che supporta le interazioni tra medici e pazienti in un clima più riservato, separato dalle stanze di degenza. All'interno della piattaforma immersiva, gli utenti possono osservare la disposizione delle apparecchiature per le visite, delle scrivanie, delle sedute e delle aree di passaggio, valutando se la stanza offre condizioni adeguate per i consulti clinici, pur mantenendo privacy e comfort.

La scena include anche la zona di accettazione e la postazione di lavoro, dove pazienti e visitatori interagiscono per la prima volta con il personale all'ingresso del reparto. Questo punto funge da interfaccia operativa tra il reparto e la circolazione esterna dell'ospedale. Da qui, infermieri e personale amministrativo coordinano le ammissioni,

forniscono informazioni e monitorano l'accesso al piano. Grazie alla realtà virtuale, la configurazione spaziale di questa postazione può essere valutata in relazione al corridoio circostante, consentendo agli utenti di valutare le condizioni di visibilità, l'accessibilità e l'efficienza dello spazio di lavoro.

L'aspetto che rende significativa l'analisi immersiva di questi spazi è in particolar modo la diversità delle persone che le utilizzano. I pazienti in cerca di svago, il personale sanitario che esegue visite, i parenti che visitano i propri familiari e gli operatori che gestiscono le attività amministrative interagiscono con questo reparto in modi del tutto diversi. La progettazione partecipata risulta particolarmente efficace proprio in contesti caratterizzati da questa varietà di punti di vista. Ognuno di questi futuri utenti può sperimentare l'ambiente attraverso la simulazione virtuale e fornire riscontri e pareri in base alle proprie esigenze e aspettative.

Gli ambienti rappresentati nella scena immersiva corrispondono in modo accurato e fedele a ciò che verrà costruito in fase di realizzazione dell'ospedale reale. Elementi architettonici, componenti strutturali e impianti tecnici riflettono i modelli di progettazione sviluppati dopo il processo di analisi immersiva delle interferenze. Le correzioni e gli allineamenti eseguiti nella fase precedente si possono osservare durante la navigazione dell'ambiente virtuale. I controsoffitti, per esempio, sono stati riconfigurati per ospitare sistemi meccanici ed elettrici senza generare conflitti o sovrapposizioni e il dislivello tra le altezze degli spazi di lavoro e dei corridoi è stato coperto attraverso la realizzazione delle apposite paratie. Tutto questo è chiaramente visibile nella scena, a dimostrazione di come siano stati introdotti adattamenti spaziali per garantire la corretta integrazione tra architettura e impiantistica.

Oltre all'esplorazione spaziale, la scena include simulazioni interattive volte a verificare l'accessibilità e la mobilità interna. Una delle caratteristiche più rilevanti è la possibilità di trasportare un modello di paziente seduto su sedia a rotelle attraverso il reparto. La sedia a rotelle è stata programmata come un oggetto interattivo che può essere afferrato e spinto dall'utente, consentendo al paziente di essere spostato lungo i corridoi, attraverso le porte e in diverse stanze. Poiché sia la sedia a rotelle che il modello del paziente corrispondono a dimensioni reali, questa simulazione fornisce un metodo affidabile per valutare le ampiezze di circolazione, gli spazi di svolta e l'efficace superamento delle barriere architettoniche. Lo stesso approccio viene applicato ai letti ospedalieri situati nell'area di dimissione, la zona in cui i pazienti si preparano a lasciare il reparto dopo aver completato il trattamento. In questa zona, i letti possono essere

manovrati lungo il corridoio e posizionati vicino alle vie di uscita, consentendo agli utenti di verificare se i trasferimenti verso gli ascensori o altre aree ospedaliere avvengono senza particolari problematiche.

Simulazioni interattive come questa aiutano a far emergere aspetti della funzionalità spaziale che attraverso rappresentazioni convenzionali sarebbero difficili da individuare. Spingere una sedia a rotelle lungo un corridoio o ruotare un lettino ospedaliero attraverso una porta evidenzia immediatamente potenziali vincoli che altrimenti passerebbero inosservati fino alla realizzazione dell'opera.

Per queste ragioni, la revisione immersiva nella scena interattiva del reparto di degenza diventa un importante strumento per validare le decisioni progettuali prima della loro implementazione nella realtà. Combinando ambientazioni realistiche, simulazioni interattive e contributi di diverse categorie di utenti, il processo introduce una forma di valutazione collaborativa in cui architettura, pratiche sanitarie e requisiti di accessibilità possono essere analizzati allo stesso tempo. L'approccio partecipativo supportato dalla realtà virtuale non solo perfeziona la progettazione, ma rafforza anche il rapporto tra il progetto e gli utilizzatori finale che abiteranno e gestiranno gli spazi ospedalieri.



Figura 96 - Vista immersiva in prima persona dello spazio di lavoro degli infermieri



Figura 97 - Vista immersiva in prima persona del soggiorno/area svago dedicata ai pazienti del reparto



Figura 98 - Vista immersiva in prima persona dell'ambulatorio

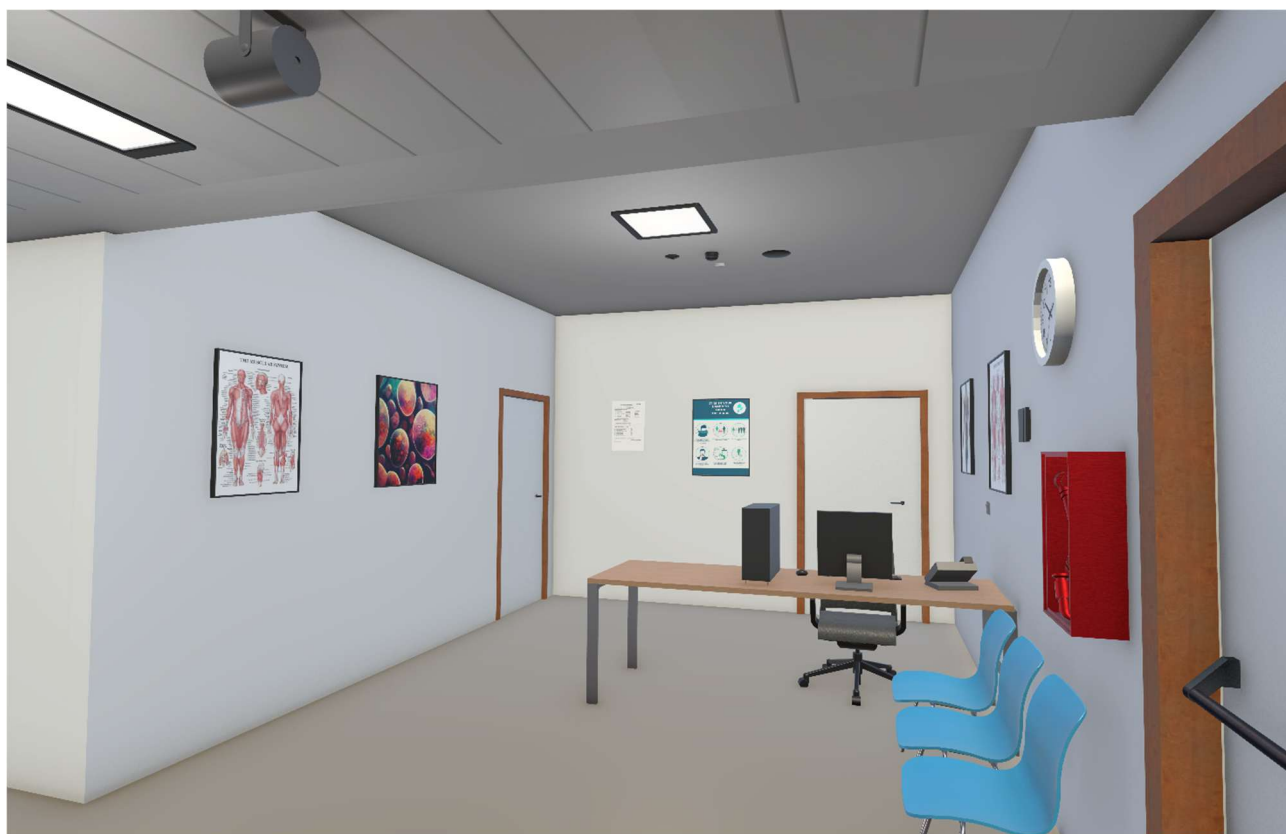


Figura 99 – Vista immersiva in prima persona della zona di accettazione e accesso al reparto

Conclusioni

La presente ricerca applicativa ha indagato l'integrazione del Building Information Modeling (BIM) e della realtà virtuale (VR) nel processo di progettazione di una struttura sanitaria complessa, con l'obiettivo di valutare l'efficacia operativa di un flusso di lavoro immersivo, orientato all'ingegneria. Attraverso la sperimentazione di una metodologia strutturata BIM-VR su un caso studio ospedaliero reale, la tesi ha esplorato i presupposti teorici per arrivare a testare il processo sviluppato in condizioni tecniche e realistiche.

I risultati conseguiti mostrano quanto la realtà virtuale sia significativamente efficace nel supportare e migliorare la progettazione, soprattutto in un contesto sanitario. La visualizzazione immersiva a grandezza reali del modello digitale permette una valutazione più consapevole e informata delle problematiche spaziali, funzionali e interdisciplinari. Al contrario dei tradizionali processi di coordinamento basati su schermo, le tecnologie VR consentono a professionisti e utenti finali di sperimentare l'ambiente ad una scala realistica 1:1, migliorando la percezione spaziale e la comprensione delle interazioni tra sistemi architettonici, strutturali e impiantistici, che spesso possono diventare molto complesse, in particolar modo in progetti ospedalieri.

Tale capacità supporta direttamente un migliore processo decisionale nelle fasi di progettazione. L'ambiente immersivo facilita l'identificazione di conflitti e incongruenze sia spaziali che funzionali, rafforzando il coordinamento tra le discipline e permettendo la convalida iterativa delle soluzioni correttive. Inoltre, la realtà virtuale integrata nella metodologia BIM si rileva particolarmente preziosa nel contesto sanitario, dove l'efficienza operativa, l'ottimizzazione del flusso di lavoro e la sicurezza degli utenti sono di fondamentale importanza. La possibilità di ottenere feedback informati e consapevoli da utenti non tecnici, come il personale medico o i potenziali pazienti ricoverati, rappresenta un vantaggio strategico, in quanto colma il divario tra modellazione tecnica e requisiti funzionali. Di conseguenza, l'ottimizzazione del layout, la verifica funzionale e la comunicazione di progetto risultano aspetti significativamente migliorati dall'applicazione dell'approccio integrato BIM-VR.

Da una prospettiva di processo, la ricerca dimostra che la collaborazione tra queste due tecnologie può essere strutturata come un flusso di lavoro coordinato piuttosto che come un semplice miglioramento della visualizzazione. La metodologia comprende la preparazione dei dati, la gestione dell'interoperabilità dei modelli, le procedure di

rilevamento dei conflitti, il monitoraggio dei problemi e i cicli di revisione e convalida immersiva. Se implementato correttamente, questo approccio contribuisce a migliorare la qualità della progettazione e ad aumentare la consapevolezza durante il processo decisionale iniziale.

Un altro aspetto scoperto attraverso la sperimentazione condotta è l'adattabilità intrinseca delle tecnologie basate sulla realtà virtuale, soprattutto in relazione ai vari livelli della progettazione. Lo studio ha coinvolto lo sviluppo e l'applicazione di ambientazioni virtuali in due contesti molto diversi, corrispondenti a fasi e obiettivi differenti, ovvero l'analisi immersiva delle interferenze interdisciplinari (attraverso l'utilizzo del software VRex) e la visualizzazione interattiva degli spazi clinici finali (tramite scene virtuali sviluppate sul motore di sviluppo Unity). Il paragone tra queste due applicazioni mostra la notevole scalabilità delle interfacce VR e la possibilità che esse offrono di essere configurate in base alle specifiche esigenze del processo di pianificazione e progettazione, in generale e soprattutto nel mondo delle costruzioni.

Per la prima parte dello studio, ovvero il rilevamento dei conflitti, l'ambiente virtuale è stato sviluppato tramite VRex, utilizzato come piattaforma di visualizzazione e coordinamento. In questa fase, l'obiettivo primario è stata la rapida individuazione e verifica delle incongruenze tra i modelli delle varie discipline del progetto. La rappresentazione dello spazio risulta quindi semplificata: le geometrie sono schematizzate, i materiali sono ridotti al minimo e la fedeltà visiva è secondaria alla leggibilità degli elementi costruttivi. La navigazione all'interno della scena è stata impostata come completamente libera, consentendo agli utenti di muoversi attraverso pareti, soffitti o impianti tecnici per ispezionare gli elementi da qualsiasi prospettiva. Questo tipo di interazione risulta molto utile durante il coordinamento tecnico, poiché permette ai progettisti di accedere rapidamente alle aree nascoste del modello ed esaminare le intersezioni tra componenti architettonici, strutturali e meccanici. Gli elementi importati sono inoltre rimasti direttamente collegati ai parametri BIM, consentendo così di interrogare gli oggetti e accedere ai metadati associati. Questa integrazione preserva la dimensione informativa del modello, trasformando l'ambiente immersivo in uno strumento avanzato per la verifica tecnica e il coordinamento interdisciplinare.

Invece, per le scene immersive sviluppate con il motore grafico Unity è stata adottata una configurazione molto diversa. In questo caso, l'obiettivo è passato alla valutazione partecipativa degli ambienti progettati. Per raggiungere questo obiettivo, i modelli BIM

sono stati sottoposti a una serie di processi di ottimizzazione e preparazione prima di essere importati nell'ambiente di rendering in tempo reale. Materiali, texture e proprietà di illuminazione sono stati attentamente definiti per produrre scene visivamente accurate e coerenti. Le superfici riflettono le finiture desiderate, le condizioni di illuminazione riproducono effetti realistici e la qualità complessiva del rendering contribuisce a una rappresentazione credibile del futuro ambiente costruito. Allo stesso tempo, l'interazione dell'utente è governata da un sistema di simulazione fisica coerente con il comportamento del mondo reale. Il movimento all'interno dello spazio virtuale è vincolato da confini fisici, che impediscono il passaggio attraverso pareti o oggetti solidi. Gli elementi interattivi rispondono alla gravità, alle collisioni e alle forze dinamiche, consentendo di afferrare, spostare e rilasciare gli oggetti in un modo che replica le interazioni fisiche del mondo reale. Queste caratteristiche rendono l'ambiente virtuale una vera e propria simulazione esperienziale dello spazio architettonico, consentendo di valutare proporzioni spaziali, accessibilità, layout funzionali e percezione ambientale in condizioni che si avvicinano molto all'esperienza del mondo reale.

La coesistenza di queste due diverse implementazioni dimostra uno dei punti di forza più significativi delle tecnologie VR all'interno dell'ecosistema BIM: la capacità di adattarsi a diverse esigenze progettuali. A seconda degli obiettivi della fase di progettazione, lo stesso modello digitale può supportare ambienti analitici altamente tecnici incentrati sull'interrogazione dei dati e sulla verifica delle interferenze, nonché simulazioni immersive e realistiche finalizzate alla comunicazione, alla convalida e alla progettazione partecipata. Questa flessibilità consente alla realtà virtuale di funzionare non come uno strumento di visualizzazione monouso, ma come un'interfaccia scalabile in grado di supportare più fasi del processo di progettazione.



Figura 100 – Differenza di visualizzazione tra le interfacce di VRex (sinistra) e delle scene interattive sviluppate (destra)

Dal coordinamento tecnico al coinvolgimento della committenza e alla validazione esperienziale, gli ambienti VR possono essere calibrati in termini di fedeltà grafica, sistemi di interazione e profondità informativa, massimizzandone l'efficacia in relazione agli obiettivi specifici di ogni fase del ciclo di vita del progetto.

Tuttavia, nonostante il potenziale dimostrato, ad oggi sussistono diverse limitazioni. L'interoperabilità tra piattaforme software è ancora complicata e spesso inefficiente, richiedendo flussi di lavoro frammentati e trasferimenti di dati tra ambienti diversi che hanno alcune difficoltà nel comunicare tra loro. La mancanza di procedure standardizzate per l'integrazione BIM-VR riduce la ripetibilità dei processi e limita la scalabilità tra progetti. Inoltre, la natura iterativa del flusso di lavoro richiede competenze avanzate, sia nella gestione BIM che nella configurazione di ambienti immersivi. Questi fattori aumentano parecchio i tempi di elaborazione e riducono l'immediata applicabilità nella pratica professionale quotidiana.

Pertanto, sebbene l'integrazione BIM-VR emerga come uno strumento potente ed efficace per il supporto alla progettazione, è attualmente caratterizzata da una complessità operativa che ne limita l'implementazione su larga scala. I risultati dell'applicazione del processo al caso studio suggeriscono che il pieno potenziale della convalida della progettazione immersiva sarà realizzato solo attraverso lo sviluppo di interfacce completamente integrate in grado di consentire l'interazione diretta con i modelli BIM all'interno degli ambienti virtuali. Tali sistemi dovrebbero ridurre al minimo la necessità di complesse fasi di programmazione e scambi di dati multiplatforma, diminuendo così i tempi e migliorando la funzionalità complessiva.

Alla luce di queste osservazioni, ci si auspica che gli sviluppi futuri si concentrino sul miglioramento degli standard di interoperabilità, sull'automazione dei processi di sincronizzazione dei dati e sul consolidamento della modellazione e della visualizzazione immersiva all'interno di ecosistemi unificati. Con la continua evoluzione della trasformazione digitale nel settore delle costruzioni e dell'ingegneria, si prevede che l'integrazione delle tecnologie virtuali passerà da un potenziamento sperimentale a una componente strutturata del flusso di lavoro di progettazione.

Il presente elaborato conferma quindi che la realtà virtuale, se integrata sistematicamente con le metodologie BIM, rappresenta non solo uno strumento di visualizzazione, ma un ambiente di supporto alle decisioni in grado di migliorare il coordinamento interdisciplinare, la validazione funzionale e la qualità della

progettazione nel settore sanitario. Nonostante persistano barriere tecnologiche e procedurali, la traiettoria dell'innovazione suggerisce che l'integrazione BIM-VR diventerà sempre più una risorsa strategica nel processo di progettazione ingegneristica.

In una prospettiva più ampia, lo studio condotto e sperimentato in questa tesi può essere interpretato in relazione agli obiettivi dell'Agenda 2030 delle Nazioni Unite per lo Sviluppo Sostenibile, in particolare per quanto riguarda l'Obiettivo 9: "Industria, Innovazione e Infrastrutture". Quest'ultimo ha lo scopo di promuovere lo sviluppo di infrastrutture resilienti, il progresso dell'innovazione tecnologica e l'adozione di strumenti digitali in grado di ottimizzare l'efficienza e la sostenibilità dei processi ingegneristici e industriali. L'integrazione del Building Information Modeling con sistemi di realtà virtuale proposta nella presente ricerca si allinea perfettamente a questi principi, esponendo metodologie digitali avanzate che migliorano il modo in cui infrastrutture complesse e sensibili, come gli edifici sanitari, vengono progettate, valutate e comunicate.

Gli edifici sanitari rappresentano alcune delle infrastrutture tecnicamente più impegnative a causa del loro elevato livello di complessità funzionale, dei rigorosi requisiti normativi che ne disciplinano la costruzione e del ruolo fondamentale che svolgono nel garantire la salute e la sicurezza pubblica. In questo contesto, i flussi di lavoro digitali che migliorano il coordinamento, riducono gli errori di progettazione e supportano un processo decisionale informato contribuiscono direttamente allo sviluppo di sistemi edili più efficienti e resilienti. Consentendo la verifica immersiva dell'organizzazione spaziale, il coordinamento interdisciplinare e la valutazione partecipativa che coinvolge stakeholder tecnici e non, l'integrazione BIM-VR presentata in questa ricerca supporta risultati di progettazione più solidi e affidabili.

Inoltre, l'adozione di tecnologie immersive all'interno del processo di progettazione riflette la più ampia trasformazione che sta interessando il settore dell'Architettura, dell'Ingegneria e delle Costruzioni (AEC), dove la digitalizzazione è sempre più riconosciuta come un motore chiave dell'innovazione. Strumenti come motori di rendering in tempo reale, ambienti virtuali interattivi e piattaforme di simulazione immersiva ampliano le possibilità delle metodologie BIM tradizionali, consentendo nuove forme di collaborazione, analisi e comunicazione durante l'intero ciclo di vita del progetto. In questo senso, il quadro metodologico sviluppato in questa tesi vuole rappresentare un contributo alla transizione digitale in corso nel settore dell'ambiente costruito. In conclusione, la ricerca dimostra che la convergenza tra la modellazione digitale avanzata e le tecnologie di visualizzazione immersiva ha il potenziale per

rimodellare le pratiche di progettazione, in particolare in settori complessi e socialmente critici come le infrastrutture sanitarie. Promuovendo l'innovazione nei flussi di lavoro ingegneristici e migliorando la qualità e l'affidabilità delle decisioni progettuali, l'integrazione BIM-VR contribuisce all'obiettivo più ampio di costruire sistemi infrastrutturali più intelligenti, più efficienti e più sostenibili, in linea con le ambizioni delineate nell'Obiettivo numero 9 dell'Agenda 2030 per lo Sviluppo Sostenibile.

Bibliografia

- Abbas, J., O'Connor, A., Ganapathy, E., Isba, R., Payton, A., McGrath, B., . . . Bruce, I. (2023). What is Virtual Reality? A healthcare-focused systematic review of definitions. *Health Policy and Technology*.
- AIA California Council. (2014). *Integrated project delivery: an update working definition*.
- Alizadehsalehi, S., Hadavi, A., & Huang, J. C. (2021). Assessment of AEC Students' Performance Using BIM-into-VR. *Applied Sciences*, 11(7).
- Applied Art & Technology. (2017). VR, AR or MR...What's the Difference & Why Should I Care? *Applied Art & Technology*.
- Autodesk. (2021). *Accelerating Digital Transformation Through BIM*. SmartMarket Report.
- Azizoğlu, H., Gürkan, Z., Bozkurt, Y., Demir, C., & Akaltun, H. (2025). The Effect of an Improved Environment According to Watson's Theory of Human Care on Sleep, Anxiety, and Depression in Patients Undergoing Open Heart Surgery: A Randomized Controlled Trial. *Healthcare*.
- Barsom, E., Graafland, M., & Schijven, M. (2016). Systematic review on the effectiveness of augmented reality applications in medical training. *Surgical Endoscopy*, 30, 4174–4183.
- Bassanino, M., Wu, K.-C., Yao, J., Khosrowshahi, F., Fernando, T., & Skjærbæk, J. (2010). The Impact of Immersive Virtual Reality on Visualisation for a Design Review in Construction. *2010 14th International Conference Information Visualisation*. London, UK: IEEE.
- Berg, L., & Vance, J. (2016). An Industry Case Study: Investigating Early Design Decision Making in Virtual Reality. *J. Comput. Inf. Sci. Eng.*, 17(1).
- BRE Global. (2016). *BREEAM International New Construction 2016 – Technical Manual*. Watford: Building Research Establishment (BRE).
- Buchanan, E., Loporcaro, G., & Lukosch, S. (2023). On the Effectiveness of Using Virtual Reality to View BIM Metadata in Architectural Design Reviews for Healthcare. *Multimodal Technologies and Interaction*.

- buildingSMART International. (2018). *Industry Foundation Classes (IFC): IFC4 ADD2 specification*.
- buildingSMART International. (2022). *buildingSMART Data Dictionary (bSDD)*.
- Chan, C.-S. (1997). Virtual Reality in Architectural Design. *Conference: Computer Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA 97)*. HsinChu, Taiwan.
- Choi, J., Leite, F., & Oliveira, D. P. (2018). BIM-based benchmarking system for healthcare projects: Feasibility study and functional requirements. *Automation in Construction*.
- Comune di Cambiano. (2019). *Piano Regolatore Generale Comunale (PRGC). Variante strutturale n. 2 – Tavola 4b*.
- Comune di Cambiano. (2019). *Variente Strutturale n. 2 al Piano Regolatore Generale Comunale – Piano di Classificazione Acustica del territorio comunale*.
- Comune di Cambiano. (2021). *Norme Tecniche di Attuazione – Variante Strutturale n. 2 al Piano Regolatore Generale Comunale (PRGC)*.
- Comune di Cambiano. (2021). *Variente Strutturale n. 2 al Piano Regolatore Generale Comunale – Norme Tecniche e Tavole di vincolo*.
- Corke, G. (2021). 12 tools for collaborative VR for architecture. *AECmagazine*.
- Data, Analytics & Delivery for impact (DDI). (2019). *World health statistics 2019: monitoring health for the SDGs, sustainable development goals*. World Health Organization.
- Delgado, M. D., Oyedele, I., Demian, P., & Beach, T. (2020). A research agenda for augmented and virtual reality in architecture, engineering and construction. *Advanced Engineering Informatics*, 45, 101-122.
- Du, J., Zou, Z., Shi, Y., & Zhao, D. (2018). Zero latency: Real-time synchronization of BIM data in virtual reality for collaborative decision-making. *Automation in Construction*, 85, 51-64.
- Eastman, C., Lee, C., & Sacks, R. (2018). *BIM Handbook: A guide to Building Information Modeling for owners, designers, engineers, contractors, and facility managers*. John Wiley & Sons Inc.
- Ente Italiano di Normazione. (2017). *UNI 11337 – Edilizia e opera di ingegneria civile – Gestione digitale dei processi informativi delle costruzioni*.

- EUBIM TaskGroup. (2017). *Handbook for the introduction of Building Information Modelling by Europe's Public Sector Community*.
- Fan, S.-L., Chi, H.-L., & Pan, P.-Q. (2019). Rule checking Interface development between building information model and end user. *Automation in Construction*, 105.
- Fink, D., & Mata, A. (2019). Digital Twin: Bringing MEP Models to Life. *Autodesk*.
- Getuli, V., Capone, P., Bruttini, A., & Isaac, S. (2020). BIM-based immersive Virtual Reality for construction workspace planning: A safety-oriented approach. *Automation in Construction*, 114, 103-160.
- Hamzeh, F., Abou-Ibrahim, H., Daou, A., Faloughi, M., & Kawwa, N. (2019). 3D visualization techniques in the AEC industry: the possible uses of holography. *Journal of Information Technology in Construction*.
- Hardin, B., & McCool, D. (2015). *BIM & Construction Management: proven tools, methods, and workflows*. John Wiley & Sons Inc.
- Hasan, M. (2025). BIM (IFC Standardization Interoperability). *Technical Report*.
- Horn, M. (2024). The AEC Trifecta: Uniting AI, Digital Twins, and BIM for Smarter Building. *Innovate Energy*.
- Huan, X., Kang, B., Xie, J., & Hancock, C. (2025). Building information modelling (BIM)-enabled facility management (FM) of nursing homes in China: A systematic review. *Journal of Building Engineering*, 99.
- International Labour Organization. (2021). *Safety and health in construction*. International Labour Organization.
- International Organization for Standardization. (2024). *ISO 16739-1:2024 — Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries — Part 1: Data schema*. ISO.
- Ismail, A., Nagapan, S., Mustafa, W. A., Abdul Rahman, M. S., & Wijayaningtyas, M. (2025). Building Information Modelling in Hospital Facilities Management Services: A Significant Systematic Review. *Journal of Advanced Research Design*, 135(1), 101-116.
- ITACA. (2011). *Protocollo ITACA 2011 — Edifici non residenziali*. Roma: Istituto per l'Innovazione e Trasparenza degli Appalti e la Compatibilità Ambientale.

- Italia. (2004). *Decreto legislativo 22 gennaio 2004, n. 42. Codice dei beni culturali e del paesaggio*. Gazzetta Ufficiale.
- Italia. (2023). *Decreto legislativo 31 marzo 2023, n. 36. Codice dei contratti pubblici*. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, Serie Generale n. 77 del 31 marzo 2023.
- Jahn, G., Newnham, C., Van der Berg, N., Iraheta, M., & Wells, J. (2020). *Holographic Construction*. RMIT University.
- Jerald, J. (2015). *The Vr Book: Human-centered Design for Virtual Reality*. ACM Books.
- Jernigan, F. E. (2007). *BIG BIM little Bim: The Practical Approach to Building Information Modeling Integrated Practice done the right Way!* 4Site Press.
- Joseph, A., Mihandoust, S., Wingler, D., Machry, H., Allison, D., & Reeves, S. T. (2021). Comparing User Perceptions of Surgical Environments: Simulations in a High-Fidelity Physical Mock-Up Versus a Postoccupancy Evaluation. *HERD: Health Environments Research & Design Journal*.
- Kamarudin, M., & Zary, N. (2019). Augmented Reality, Virtual Reality and Mixed Reality in Medical Education: A Comparative Web of Science Scoping Review. *Preprints*.
- Kieferle, J., & Woessner, U. (2015). BIM interactive—about combining bim and virtual reality. *Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe*.
- Kuliga, S., Thrash, T., Dalton, R., & Hölscher, C. (2015). Virtual reality as an empirical research tool — Exploring user experience in a real building and a corresponding virtual model. *Computers Environment and Urban Systems*, 54(6).
- Lacoma, T. (2023). What is VR? *digitaltrends*.
- Lee, M., Chai, C., Xiong, Y., & Gui, H. (2022). Technology acceptance model for building information modelling based virtual reality (BIM-VR) in cost estimation. *Journal of Information Technology in Construction*.
- Lescop, L. (2017). 360° vision, from panoramas to VR. In T. Maver, P. Chapman, C. Platt, V. Portela, D. Eaton, & L. Lescop, *ENVISIONING ARCHITECTURE: SPACE / TIME / MEANING* (p. 226–232). Glasgow, United Kingdom: Mackintosh School of Architecture and the School of Simulation and Visualization at the Glasgow School of Art.

- Lin, Y.-C., Chen, Y.-P., Yien, H.-W., Huang, C.-Y., & Su, Y.-C. (2018). Integrated BIM, game engine and VR technologies for healthcare design: A case study in cancer hospital. *Advanced Engineering Informatics*, Volume 36, 130-145.
- Lin, Y.-C., Chen, Y.-P., Yien, H.-W., Huang, C.-Y., & Su, Y.-C. (2018). Integrated BIM, game engine and VR technologies for healthcare design: A case study in cancer hospital. *Advanced Engineering Informatics*, 36, 130-145.
- Lin, Y.-C., Chen, Y.-P., Yien, H.-W., Huang, E. C., & Su, Y.-C. (2018). Integrated BIM, game engine and VR technologies for healthcare design: A case study in cancer hospital. *Advanced Engineering Informatics*, 36, 130-145.
- Lu, J., Fu, C., Zhou, T., Xie, J., & Loo, Y. (2022). A Review of Physical and Digital Mock-Up Applications in Healthcare Building Development. *buildings*.
- Luminousxr. (s.d.). *Immersive VR Construction Training*. Tratto da <https://www.luminousxr.com/vr-training-construction/>
- Mascia, D., Mosci, L., Spallarossa, E., & Troilo, M. (2020). La digitalizzazione nel settore ospedaliero: un esempio pratico di progetto integrato in BIM. *Ingenio*.
- Mills, G. R., Phiri, M., Erskine, J., & Price, A. D. (2015). Rethinking healthcare building design quality: an evidence-based strategy. *Building Research & Information*, 43(4), 499-515.
- Ministero della Salute. (2015). *Decreto Ministeriale 2 aprile 2015, n. 70. Regolamento recante definizione degli standard qualitativi, strutturali, tecnologici e quantitativi relativi all'assistenza ospedaliera*. Italia: Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, n. 127.
- Ministero della Sanità. (1975). *Decreto Ministeriale 5 luglio 1975: Modificazioni alle istruzioni ministeriali 20 giugno 1896 relativamente all'altezza minima ed ai requisiti igienico-sanitari principali dei locali di abitazione*. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana.
- Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti. (2018). *Norme tecniche per le costruzioni. Decreto Ministeriale 17 gennaio 2018*. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, n. 42.
- Ministero dell'Interno. (2002). *Decreto ministeriale 18 settembre 2002: Regola tecnica di prevenzione incendi per la progettazione, la costruzione e l'esercizio delle strutture*

sanitarie pubbliche e private. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, n. 227 del 27 settembre 2002.

Ministero per i Beni e le Attività Culturali. (2008). *Decreto Ministeriale 16 giugno 2008, n. 8574/08*. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, 152.

Montagna, L. (2018). *Realtà virtuale e realtà aumentata. Nuovi media per nuovi scenari di business*. Hoepli.

Moretti, N., Xie, X., Merino, J., Brazauskas, J., & Parlikad, A. K. (2020). An openBIM Approach to IoT Integration with Incomplete As-Built Data. *Applied Sciences*, 10(22), 8287.

Muhammad, A. A., Yitmen, I., Alizadehsalehi, S., & Celik, T. (2020). Adoption of Virtual Reality (VR) for Site Layout Optimization of Construction Projects. *Teknik Dergi*, 31(2), 9833-9850.

Mulva, S. P., & Dai, J. (2009). Healthcare facility benchmarking. *HERD*, 3(1), 28-37.

Murano, P., & Mackey, D. (2007). Usefulness of VRML building models in a direction finding context. *Interacting with Computers*, 19(3), 305-316.

NBS. (2019). *National BIM Report 2019. The definitive industry update*.

NBS. (2025). *Digital Construction Report 2025*.

OICE. (2024). *7° report OICE sulla digitalizzazione e sulle gare BIM 2023*.

OICE. (2025). *8° report OICE sulla digitalizzazione e sulle gare BIM 2024*.

Osello, A. (2012). *Il futuro del disegno con il BIM per ingegneri e architetti*. Flaccovio Dario.

Parlamento italiano. (2023). *Decreto Legislativo 31 marzo 2023, n. 36. Nuovo codice dei contratti pubblici*. Gazzetta Ufficiale Serie Generale n. 87 del 13-04-2023.

Presidenza del Consiglio dei Ministri. (2021). *Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR)*. Governo Italiano.

Regione Piemonte. (2009). *Legge regionale 4/2009. Gestione e tutela del patrimonio forestale*.

Regione Piemonte. (2017). *Piano Paesaggistico Regionale – Tavole P2 e P3*.

Regione Piemonte, Giunta Regionale. (2014). *Deliberazione della Giunta Regionale 19 novembre 2014, n. 1-600*. Bollettino Ufficiale della Regione Piemonte.

- Regione Piemonte, Giunta Regionale. (2015). *Deliberazione della Giunta Regionale 23 gennaio 2015, n. 1-924*. Bollettino Ufficiale della Regione Piemonte.
- Rokooei, S., Shojaei, A., Alvanchi, A., Azad, R., & Didehvar, N. (2023). Virtual reality application for construction safety training. *Safety Science*, 157.
- Safikhani, S., Keller, S., Schweiger, G., & Pirker, J. (2022). Immersive virtual reality for extending the potential of building information modeling in architecture, engineering, and construction sector: systematic review. *International Journal of Digital Earth*, 15(1), 503–526.
- Salem, O., Samuel, I. J., & He, S. (2020). BIM and VR/AR technologies: From project development to lifecycle asset management. *Proceedings of the International Structural Engineering and Construction, Angamaly, India*.
- Schley, M., Haines, B., Roper, K., & Williams, B. (2016). BIM for facility management. *BIM-FM Consortium*.
- Singh, A. (2019). *Realtà Virtuale*. Babelcube Inc.
- Speicher, M., Hall, B., & Nebeling, M. (2019). What is Mixed Reality? *CHI*, 537, 1–15.
- Sydora, C., & Stroulia, E. (2020). Rule-based compliance checking and generative design for building interiors using BIM. *Automation in Construction*, 120.
- Tan, T., Millis, G., Papadonikolaki, E., Xu, Y., & Chen, K. (2023). Building Information Modelling in Healthcare Design and Construction: a Bibliometric Review and Systematic Review. *Advances in Information Technology in Civil and Building Engineering*.
- Tural, A., & Tural, E. (2025). Comparative Analysis of Restorative Interior Design Elements: Screen-Based Versus Virtual Reality Evaluations for Future Medical Treatment Prospects. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 22(1).
- U.S. Green Building Council (USGBC). (2019). *LEED v4.1 – Building Design and Construction (BD+C)*. Washington, DC: U.S. Green Building Council.
- Ulrich, R. S., Zimring, C., Zhu, X., DuBose, J., Seo, H.-B., Choi, Y.-S., . . . Anjali, J. (2008). A review of the research literature on evidence-based healthcare design. *HERD: Health Environments Research & Design Journal*.

- UNI. (2017). *UNI 11337-1:2017 – Gestione digitale dei processi informativi delle costruzioni – Parte 1: Modelli, elaborati e oggetti informativi per prodotti e processi nel settore delle costruzioni*. Ente Italiano di Normazione.
- Vilar, E., Filgueiras, E., & Rebelo, F. (2022). *Virtual and Augmented Reality for Architecture and Design*. CRC Press.
- Vixel and partners. (2020). *The value of virtual reality with BIM*.
- Wanigarathna, N., Jones, K., Bell, A., & Kapogiannis, G. (2019). Building information modelling to support maintenance management of healthcare built assets. *Facilities*, 37(7-8), 415-434.
- Whyte, J., & Nikolic, D. (2018). *Virtual reality and the built environment (2nd edition)*. Routledge.
- Whyte, J., Bouchlaghem, N., Thorpe, A., & McCaffer, R. (2000). From CAD to virtual reality: modelling approaches, data exchange and interactive 3D building design tools. *Automation in Construction*, 10(1), 43-55.
- World Economic Forum. (2016). *Shaping the Future of Construction. A Breakthrough in Mindset and Technology*.
- Yang, T., White, M., Lipson-Smith, R., Shannon, M., & Latifi, M. (2024). Design Decision Support for Healthcare Architecture: A. *Buildings*.
- Yigitbas, E., Nowosad, A., & Engels, G. (2023). Supporting Construction and Architectural Visualization through BIM and AR/VR: A Systematic Literature Review. *Paderborn University*.