

ARTICLE INFO

Received	10 March 2026
Revised	10 April 2026
Accepted	13 April 2026
Published	30 June 2026

APPRENDIMENTO IMMERSIVO PER AULE RESILIENTI

Infrastruttura digitale per arredi salvavita

IMMERSIVE LEARNING FOR RESILIENT CLASSROOMS

Digital infrastructure for life-saving furniture

Federico Orfeo Oppedisano, Daniele Rossi, Manuel Scortichini

ABSTRACT

Nelle aree ad elevata pericolosità sismica la sicurezza delle scuole dipende non solo dalle prestazioni strutturali degli edifici, ma anche dalla capacità di riconoscere e utilizzare correttamente i dispositivi di protezione e le procedure operative. In tale ottica il contributo presenta lo sviluppo di un Immersive Learning Environment (ILE) come infrastruttura digitale socio-tecnica a supporto del Life Saving Furniture System (LSFS), sviluppato nell'ambito del programma di ricerca interuniversitario Vitality. L'ILE integra realtà virtuale, contenuti a 360° e realtà aumentata, basandosi su un gemello digitale statico dell'aula. La ricerca adotta un approccio di ricerca attraverso il design e una sperimentazione pilota con un modello ibrido. I risultati preliminari indicano una migliore comprensibilità del sistema LSFS, un profilo di usabilità complessivamente positivo e segnali promettenti sul piano della risposta procedurale.

In areas of high seismic risk, school safety depends not only on the structural performance of buildings, but also on occupants' ability to recognise and correctly use protective devices and operational procedures. With this in mind, the paper presents the development of an Immersive Learning Environment (ILE) conceived as a digital socio-technical infrastructure supporting the Life Saving Furniture System (LSFS), developed within the inter-university research programme Vitality. The ILE integrates virtual reality, 360° content and augmented reality, relying on a static digital twin of the classroom. The research adopts a design-led approach, combined with hybrid model-based pilot experimentation. Preliminary results suggest improved understanding of the LSFS, an overall positive usability profile, and encouraging indications of procedural responsiveness.

KEYWORDS

ambiente di apprendimento immersivo, infrastruttura digitale, gemello digitale, preparazione sismica, arredi salvavita

immersive learning environment, digital infrastructure, digital twin, seismic preparedness, life-saving furniture

Federico Orfeo Oppedisano, Associate Professor of Industrial Design at the School of Architecture and Design of the University of Camerino (Italy), conducts research on communication design, images in digital media, immersive virtual reality for cultural heritage, colour in design culture, and design for childhood, with a focus on technology-mediated learning environments and social communication. E-mail: federico.oppedisano@unicam.it

Daniele Rossi is a Full Professor of Drawing at the School of Architecture and Design, University of Camerino (Italy). His research explores digital representation in architecture and design, with a focus on 3D modelling and advanced digital morphogenesis, photogrammetric surveying and visualisation, and VR/AR immersive environments as spatial media for narrative, communication, and technology-mediated learning. E-mail: daniele.rossi@unicam.it

Manuel Scortichini, Researcher in Industrial Design at the University of Camerino (SAAD, Ascoli Piceno, Italy), focuses his research on the relationship between museums and visitors, design for interaction and cultural heritage, with particular attention to user engagement in interactive exhibitions. E-mail: manuel.scortichini@unicam.it



Nelle aree ad alto rischio sismico la resilienza degli edifici scolastici non si limita alla prestazione strutturale, ma dipende anche dalla capacità degli occupanti di riconoscere, attivare e utilizzare correttamente i dispositivi di sicurezza predisposti negli ambienti. L'innovazione tecnica rimane fragile quando è difficile da riconoscere nell'uso quotidiano e non trasferibile tra contesti e gruppi di utenti diversi (Pietroni, Mascitti and Galloppo, 2021). Il problema non è meramente tecnico ma riguarda da un lato la mediazione tra artefatto, corpo e spazio, dall'altro le condizioni che rendono possibile un'azione corretta e tempestiva in condizioni di stress controllato, in linea con gli studi che hanno mostrato come il comportamento in caso di terremoto sia influenzato da fattori situazionali, percettivi e contestuali (Alexander, 1990).

In tale ottica il contributo presenta il Life Saving Furniture System (LSFS), un sistema di arredo protettivo per ambienti scolastici sviluppato nell'ambito del programma Vitality (Spoke 6, WP3) con l'obiettivo di guidare posture e comportamenti durante un evento sismico attraverso un insieme coordinato di elementi di arredo che integrano funzioni protettive e funzione didattica (Pietroni, Mascitti and Galloppo, 2021; Pietroni et alii, 2025; Fig. 1).

L'ipotesi di ricerca è che l'apprendimento immersivo, quando integrato nel processo di progetto, non debba essere trattato come un livello di formazione aggiuntivo, bensì come una componente dell'innovazione stessa, capace di ridurre l'ambiguità interpretativa, rafforzare la memoria procedurale e rendere leggibile la relazione tra corpo, arredo e spazio in condizioni di stress controllato. In questa prospettiva l'Immersive Learning Environment (ILE) non è un accessorio del LSFS, ma la sua infrastruttura digitale abilitante, intesa come sistema capace di mettere in relazione oggetto, spazio, contenuti e processi di apprendimento in un quadro di crescente complessità del progetto digitale (Valenti et alii, 2025; Davidová, Barath and Dickinson, 2023; Nava and Melis, 2024).

Alla luce di tali premesse il contributo intende colmare un duplice vuoto di ricerca: da un lato la limitata integrazione tra dispositivi fisici di protezione, apprendimento procedurale e infrastrutture digitali per la preparazione sismica, dall'altro la carenza di protocolli sperimentali capaci di connettere in modo coerente oggetto fisico, gemello digitale e valutazione dei comportamenti in condizioni di stress controllato. In questa prospettiva il contributo propone un avanzamento su tre piani: l'innovazione dell'oggetto, rappresentata dal Life Saving Furniture System; l'innovazione di sistema, rappresentata dall'Immersive Learning Environment, inteso non come supporto accessorio ma come infrastruttura sociotecnica dell'apprendimento; l'innovazione metodologica, rappresentata dal ciclo fisico-virtuale-fisico, dalla costruzione del gemello digitale e dal protocollo pilota di validazione. Il contributo si articola in cinque parti: stato dell'arte, descrizione del sistema, metodologia, risultati preliminari e discussione critica, limiti e sviluppi futuri.

Stato dell'arte: preparazione sismica, giochi formativi immersivi e vincoli dell'interazione uomo-computer | La formazione alla prevenzione sismica attraverso ambienti immersivi è un ambito in rapida evoluzione. Le prime applicazioni di Realtà Virtuale (VR) per l'addestramento all'evacuazione hanno dimostrato la superiore efficacia dei giochi for-

mativi immersivi rispetto ai metodi tradizionali sia nel consolidare l'apprendimento delle procedure sia nel favorire risposte comportamentali più tempestive (Chittaro and Buttussi, 2015; Chittaro and Sioni, 2015). Questa superiorità trova fondamento in due meta-analisi condotte da Sitzmann (2011): la prima, su 65 studi, documenta un apprendimento delle procedure superiore al 14% e dichiarativo all'11% rispetto ai metodi convenzionali, la seconda, su 77 studi, conferma effetti significativi sui processi cognitivi e sulla motivazione intrinseca.

In questa stessa direzione la meta-analisi di Wouters et alii (2013) conferma che i giochi formativi producono effetti positivi sul piano cognitivo e motivazionale, soprattutto quando integrano in modo coerente obiettivi di apprendimento, interazione e feedback. Più recentemente le revisioni sistematiche di Scorgie et alii (2024), Stefan, Mortimer e Horan (2023) e Kaggwa et alii (2025) confermano il consolidarsi della realtà virtuale come strumento di formazione teso alla sicurezza e alla preparazione all'emergenza, evidenziandone il potenziale ma anche la necessità di ulteriori verifiche su costi, accessibilità, sicurezza d'uso e protocolli valutativi più omogenei e comparabili. La revisione di Feng et alii (2018) documenta un corpus crescente di studi che evidenziano il potenziale di questi strumenti nel modificare stabilmente i comportamenti di risposta all'emergenza; il successivo studio degli stessi autori (Feng et alii, 2020) dimostra empiricamente che un ambiente immersivo di gioco formativo in realtà virtuale migliora sia le risposte comportamentali durante il sisma sia la prevenzione post-evento.

Nel campo della prevenzione sismica Li et alii (2017) validano un sistema di addestramento tramite esercitazioni virtuali con miglioramenti significativi nei tempi di risposta; Lovreglio et alii (2018) prototipano un sistema VR per la formazione in edifici ospedalieri; Xu et alii (2019) propongono un metodo di costruzione di scene virtuali di danno sismico per componenti non strutturali interni, finalizzato allo sviluppo di esercitazioni virtuali di sicurezza sismica; Rajabi, Taghaddos e Zahrai (2022) integrano metriche di valutazione dell'ansia introducendo una dimensione psicofisiologica; Lin et alii (2020) indagano le dinamiche di gruppo nell'evacuazione in VR cross-culturale.

In questa stessa direzione le più recenti revisioni della letteratura sull'evacuazione in ambienti interni mostrano come la realtà virtuale assuma un ruolo crescente non solo come ambiente di simulazione, ma anche come dispositivo di progetto e raccolta dati nei contesti di emergenza (Liu and Liu, 2024; Hung, Lin and Hsiao, 2025). I modelli di evacuazione pedonale di Bernardini, Quagliarini e D'Orazio (2016) forniscono la cornice quantitativa per calibrare i parametri di simulazione dell'ILE. Parallelamente applicazioni commerciali come Earthquake Simulator VR¹ documentano una domanda sociale per questo tipo di strumenti e anticipano soluzioni di progettazione dell'interazione poi riprese in contesti formativi strutturati.

Casi di riferimento e buone pratiche | Un confronto sintetico fra alcuni casi internazionali consente di chiarire il posizionamento del presente contributo. I casi qui assunti come riferimento sono stati selezionati secondo quattro criteri: pertinenza rispetto alla preparazione sismica, impiego di tecnologie immersive, presenza di metriche comportamentali o valutative e rilevanza per la costruzione di proto-

colli formativi replicabili. Un primo caso significativo è quello di Rajabi, Taghaddos e Zahrai (2022), che sviluppano un ambiente immersivo per la formazione alla sicurezza sismica riferito a un'aula scolastica, mettendo a confronto l'istruzione tradizionale con quella mediata dalla realtà virtuale e introducendo una dimensione di valutazione dell'ansia. Il punto di forza del lavoro risiede nella pertinenza al contesto scolastico e nella combinazione tra apprendimento procedurale e indicatori psicofisiologici; il limite principale consiste nella minore attenzione alla relazione tra il dispositivo fisico, lo spazio e il comportamento.

Un secondo caso rilevante è quello di Feng et alii (2020), che propongono un sistema di addestramento immersivo orientato al miglioramento delle risposte comportamentali durante il sisma e della preparazione post-evento. Il punto di forza risiede nella capacità di mettere in relazione l'ambiente immersivo, gli obiettivi di apprendimento e la verifica degli esiti formativi; la criticità dello studio è che l'attenzione si concentra soprattutto sulla simulazione e sul comportamento dell'utente, più che sull'integrazione con un dispositivo fisico progettato come mediatore dell'azione protettiva.

Un terzo caso di utile riferimento è quello di Lovreglio et alii (2018), sviluppato in ambito ospedaliero, che affronta in modo esplicito la prototipazione di un sistema di realtà virtuale per la preparazione sismica. Il contributo è utile per la chiarezza con cui esplicita i componenti di progetto del sistema immersivo e le scelte di rappresentazione dell'evento; al tempo stesso resta riferito a un contesto funzionale diverso da quello scolastico e non mette in relazione l'addestramento immersivo con un sistema di arredo salvavita.

Rispetto a tali esperienze il presente contributo si distingue per il tentativo di connettere in un unico quadro il sistema di arredo LSFS, l'Immersive Learning Environment, il gemello digitale dell'aula e una validazione pilota orientata alla trasferibilità. Questo quadro trova ulteriore conferma nelle più recenti revisioni della letteratura che riconoscono alla realtà virtuale un ruolo crescente nei dispositivi di formazione alla sicurezza e nei processi di preparazione all'emergenza in contesti di evacuazione e gestione del rischio, pur segnalando la necessità di protocolli valutativi più robusti, di confronti più espliciti fra condizioni formative e di misurazioni di lungo periodo sulla tenuta degli apprendimenti (Scorgie et alii, 2024; Stefan, Mortimer e Horan, 2023; Liu and Liu, 2024; Hung, Lin and Hsiao, 2025).

In questa prospettiva i casi esaminati confermano la solidità del campo di ricerca e rendono più leggibile il margine di originalità del presente lavoro sul piano dell'integrazione fra oggetto, infrastruttura digitale e protocollo metodologico.

Il concetto di 'gemello digitale' applicato agli ambienti costruiti ha conosciuto un'evoluzione significativa. D'Amore (2025) propone un'architettura a tre componenti – spazio fisico, controparte virtuale e ponte bidirezionale – come quadro di riferimento per l'integrazione del gemello digitale nel processo edilizio. Wang et alii (2026) mostrano come le più recenti tecnologie digitali per la preparazione all'emergenza negli edifici tendano a configurarsi come ecosistemi integrati, nei quali realtà virtuale, realtà aumentata, BIM, sensori e gemelli digitali cooperano nella costruzione di ambienti più responsivi e orientati alla gestione delle emergenze. La formazione attraverso ambienti ibridi fisico-

digitali trova un quadro teorico nel concetto di apprendimento fisico-digitale (phygital) elaborato da Franzo, Quartu e Tufarelli (2025): il gemello digitale non simula l'oggetto, ma co-produce comportamenti competenti attraverso l'interazione con la sua controparte reale. Giachetta e Buondonno (2024) documentano come gli strumenti immersivi producano effetti cognitivi misurabili e distinti dalla prefigurazione mentale; Vacanti et alii (2025) propongono il concetto di prestazione tecno-temporale per descrivere il progetto del tempo nell'interazione digitale; Zehr Gantz et alii (2025) dimostrano come il disagio di un ambiente costituisca una leva pedagogica intenzionale capace di amplificare l'impatto duraturo dell'esperienza formativa: principio strutturale della simulazione sismica dell'ILE. Il con-

tributo di Davidová, Barath e Dickinson (2023) sulla prototipazione come pratica che integra ricerca e formazione fornisce il fondamento metodologico alla doppia natura del modello ibrido sviluppato in questa ricerca.

Il contributo nel quadro dello stato dell'arte | Dalla letteratura esaminata emergono tre elementi non ancora pienamente integrati. Il primo riguarda il rapporto tra dispositivi fisici di protezione e ambienti immersivi: molti studi analizzano la simulazione dell'evento sismico o la formazione procedurale, ma più raramente tali dimensioni vengono sviluppate a partire da un sistema di arredo progettato per guidare comportamenti protettivi nello spazio scolastico. Il secondo riguarda la scala sistemica dell'in-

novazione: gli ambienti immersivi sono spesso trattati come strumenti aggiuntivi di addestramento, più che come componenti strutturali di un ecosistema sociotecnico capace di connettere oggetto, spazio, dati e apprendimento. Il terzo riguarda il piano metodologico: le sperimentazioni che combinano prototipo fisico, gemello digitale, interazione in tempo reale e protocolli di valutazione orientati alla trasferibilità risultano ancora limitate.

In questo quadro il contributo esplicita il proprio profilo di originalità su tre piani. Sul piano dell'oggetto il Life Saving Furniture System introduce un sistema di arredo salvavita che integra funzione protettiva, funzione didattica e leggibilità d'uso. Sul piano del sistema l'Immersive Learning Environment è concepito come infrastruttura sociotecnica abilitante, capace di mettere in relazione il banco fisico, il gemello digitale, i contenuti immersivi e i processi di apprendimento. Sul piano metodologico la ricerca sperimenta un ciclo fisico-virtuale-fisico che connette rilievo, modellazione, simulazione, riscontro operativo e restituzione critica in un unico dispositivo di ricerca attraverso il design, come sintetizzato nel workflow di sviluppo iterativo LSFS-ILE (Fig. 2).

Il Life Saving Furniture System | Il Life Saving Furniture System è un sistema di arredo protettivo per gli ambienti scolastici delle aree ad alto rischio sismico dell'Italia centrale. Sviluppato nell'ambito del programma Vitality come risposta alle criticità emerse dopo i terremoti del 2016-2017 in Abruzzo, Lazio, Marche e Umbria, integra le funzioni protettiva, didattica e di presidio ambientale (Pietroni, Mascitti and Galoppo, 2021; Pietroni et alii, 2025).

Il sistema è composto da un insieme coordinato di elementi: il banco protettivo principale (Fig. 3), progettato per resistere al carico da crollo degli elementi non strutturali e per guidare la postura corretta (testa abbassata, braccia a protezione della nuca, corpo raccolto) in conformità alle linee guida internazionali di prevenzione sismica (Centers for Disease Control and Prevention, 2024); elementi complementari di seduta e contenimento; componenti di connessione e segnalazione. Il banco è do-

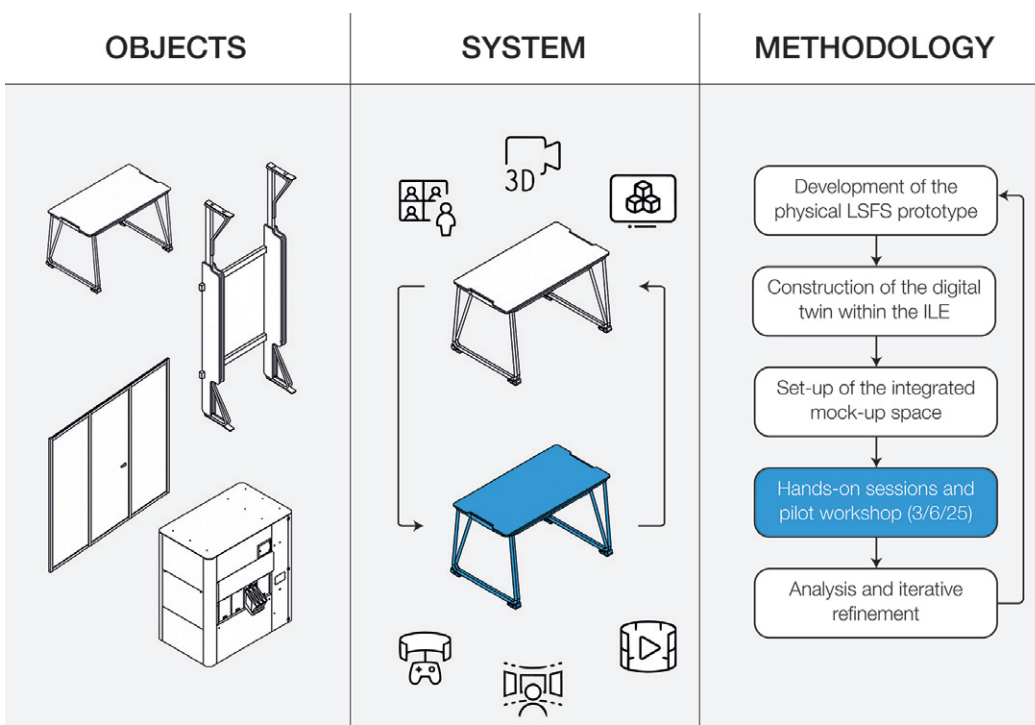


Fig. 1 | Full-scale prototype of the LSFS: overview of desks, coordinated seating, and the reference school interior. (credit: I. Fabbri, 2025).

Fig. 2 | Outline of the LSFS-ILE system articulated across three research planes: the elements of the LSFS, the physical-virtual pedagogical infrastructure of the ILE, and the working methodology (credit: the Authors, 2025).

tato di una sensoristica che, integrata nel gemello digitale, consente il monitoraggio in tempo reale durante la simulazione. La peculiarità progettuale del Life Saving Furniture System consiste nel risolvere una contraddizione strutturale: per essere efficace in un'emergenza il sistema deve essere operabile automaticamente, senza richiedere un processo deliberativo in situazione di pericolo. Questo richiede che la formazione sviluppi una memoria procedurale robusta, non una mera conoscenza dichiarativa: è esattamente per risolvere questa discontinuità che l'ILE è stato progettato. Il Life Saving Furniture System si inserisce in una tradizione di ricerca sul design per la sicurezza collettiva che, come documentato da Valenti et alii (2025), richiede di affrontare simultaneamente le scale dell'oggetto, dell'architettura e del sistema sociale.

Metodologia: ricerca attraverso il design e ciclo fisico-virtuale-fisico | L'ILE adotta un'architettura modulare basata su tre canali integrati, progettati per coprire fasi e modalità d'uso distinte del ciclo di apprendimento, garantendo coerenza geometrica, percettiva e narrativa con il Life Saving Furniture System fisico (Fig. 4).

Il primo canale è il modulo VR per l'esplorazione guidata e la simulazione: questo è il cuore esperienziale dell'ILE, il cui funzionamento si basa sui principi di percezione, interazione e visualizzazione che definiscono l'architettura dei sistemi di realtà virtuale (LaValle, 2023). L'utente esplora in prima persona l'aula ricostruita con il Life Saving Furniture System, comprende il sistema attraverso visualizzazioni diegetiche e viste esplicative ed esegue la simulazione del terremoto con feedback posturale in tempo reale; l'esperienza è strutturata in due livelli, descritti nella sezione dedicata alla progettazione dell'esperienza.

Il secondo canale è costituito dai contenuti 360° per l'introduzione iniziale, le micronarrazioni e il confronto tra reale e virtuale: le fotografie e i video panoramici consentono un accesso graduale all'esperienza, fruibile anche tramite dispositivi tecnologicamente semplici (smartphone con visori a basso costo) senza richiedere la piena immersività della

realtà virtuale. Questo canale è particolarmente rilevante per la preparazione pre-sessione e la revisione post-simulazione (Franzo, Quartu and Tufarelli, 2025; Fig. 5).

Il terzo canale è l'estensione Realtà Aumentata (AR) per lo studio della postura in situ e la verifica dell'installazione: l'applicazione AR, utilizzabile su tablet o smartphone in contesti fisici reali, consente di visualizzare sovrapposizioni informative sul banco (indicatori di postura corretta, sequenze procedurali, logica strutturale del sistema) e supporta sessioni collaborative in cui gruppi di studenti o insegnanti lavorano simultaneamente nello spazio fisico (Fig. 6).

A sostegno di tutti e tre i canali un archivio digitale centralizzato, con contenuti digitali e testi ag-

giornati in modo controllato garantisce la coerenza tra il prototipo fisico e i contenuti digitali: ogni aggiornamento al Life Saving Furniture System si riflette su tutti i canali digitali attraverso un processo di aggiornamento delle risorse digitali (D'Amore, 2025; Peruccio, Liboni and Mucchetti, 2025). L'architettura risponde all'esigenza di superare la dicotomia tra prefigurazione spaziale immersiva e controllo procedurale (Giachetta and Buondonno, 2024), integrando i due poli nel ciclo fisico-virtuale-fisico. L'adozione dello standard ISO/IEC 9234:2025 garantisce la conformità ai requisiti internazionali di interoperabilità e portabilità dei contenuti immersivi (ISO/IEC, 2025), cruciale per la trasferibilità del sistema a contesti scolastici diversi (Valenti et alii, 2025; Canessa and Centanaro, 2024).



ILE ARCHITECTURE

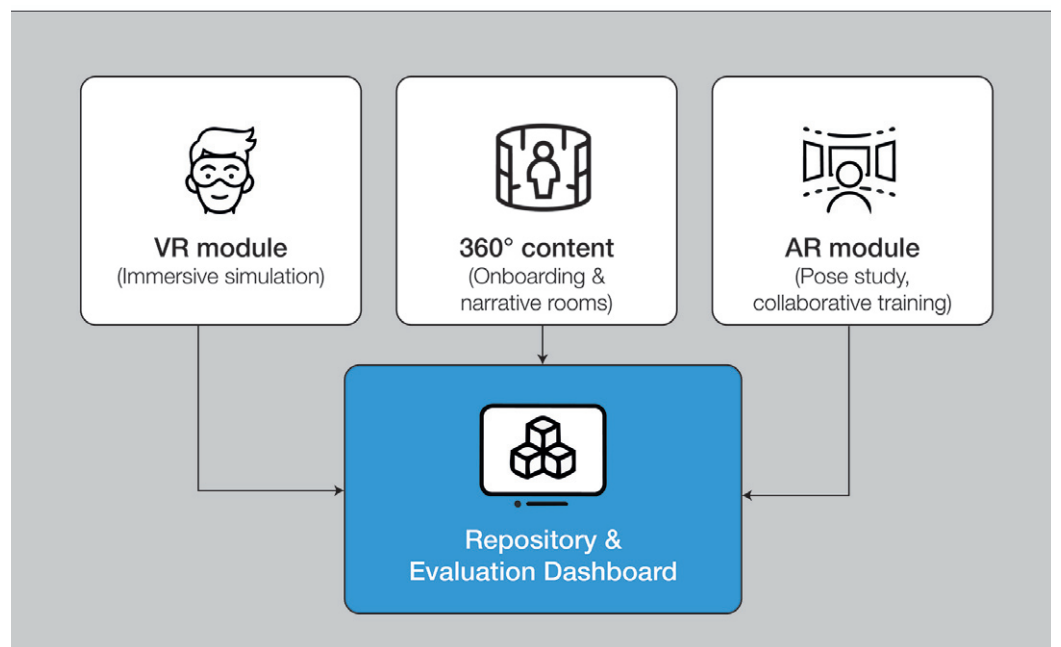


Fig. 3 | Seismic simulation conducted with students from the 'Fermi Sacconi Ceci' Istituto Tecnico Superiore in Ascoli Piceno, Italy (credit: I. Fabbri, 2025).

Fig. 4 | Modular architecture of the ILE ecosystem: the three integrated channels (VR module, 360° content, AR extension) and a centralised storage system with a shared evaluation platform (credit: the Authors, 2025).

ILE WORKFLOW

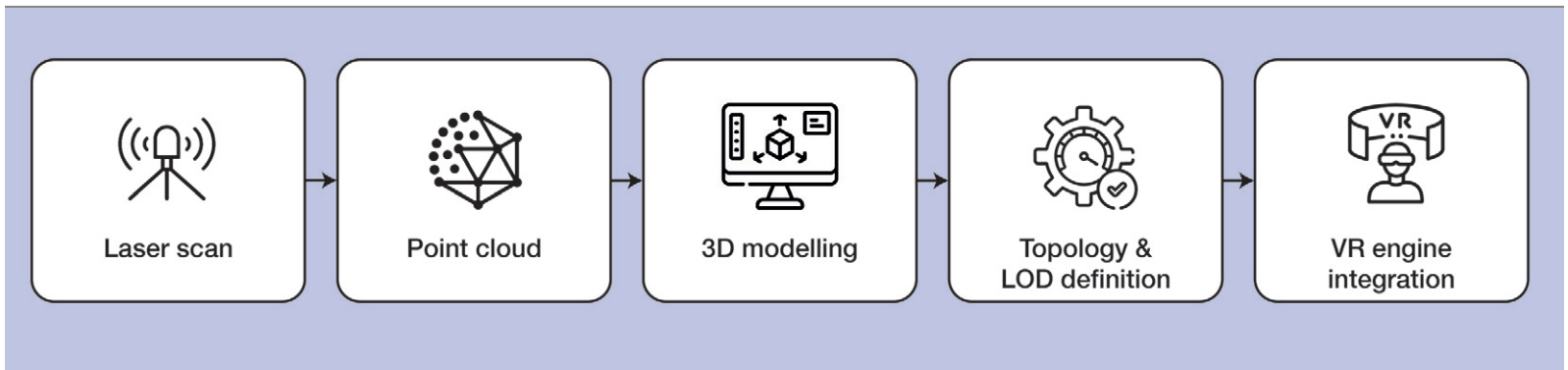


Fig. 5 | Workflow for the survey of the sample classroom: point cloud from the laser scanner, metric plans and sections, and basic three-dimensional processing for the construction of the digital twin (credit: the Authors, 2025).

Architettura dell'ecosistema ILE e costruzione del gemello digitale

Il gemello digitale del sistema aula-LSFS costituisce il pilastro tecnico dell'ILE, il componente che assicura la corrispondenza geometrica, percettiva e funzionale tra l'ambiente fisico di addestramento e quello virtuale di simulazione. Il processo di creazione del gemello digitale segue un flusso in tre fasi.

La prima fase è il rilievo dell'aula, effettuato tramite scansione laser e acquisizione di una nuvola di punti ad alta densità (Fig. 7); in parallelo il Life Saving Furniture System viene acquisito tramite fotogrammetria per produrre un modello percettivamente fedele in VR. La seconda fase è la 'modellazione e ottimizzazione': il modello grezzo viene elaborato per l'uso in tempo reale, riducendo il numero di poligoni e ottimizzando le texture per garantire una frequenza di aggiornamento stabile (Fig. 8). Il mantenimento della coerenza geometrica tra il modello ad alta fedeltà e quello ottimizzato richiede iterazioni successive di verifica visiva e metrica. La terza fase è l'integrazione sensoriale: i sensori integrati nel Life Saving Furniture System fisico vengono collegati al modello virtuale tramite un'architettura di collegamento bidirezionale che consente un riscontro in tempo reale.

Pur non essendo ancora pienamente implementato nell'attuale fase pilota dell'ILE, il flusso di dati in tempo reale tra l'arredo fisico e il modello virtuale è stato concepito come segue: i sensori trasmettono dati di postura e di prossimità a un sistema intermedio di gestione dei dati che li traduce in segnali comprensibili dal motore VR; il gemello digitale aggiorna la visualizzazione della rappresentazione virtuale dell'utente generando riscontri visivi (variazioni cromatiche e indicatori visivi sovrapposti) sulla correttezza della posizione; i dati vengono registrati in un registro temporale utile alla costruzione delle metriche post-sessione. Questo flusso bidirezionale – dal fisico al virtuale per il feedback posturale e dal virtuale al fisico per la modulazione dell'intensità della simulazione – realizza la funzione di ponte bidirezionale nel modello a tre componenti del gemello digitale (D'Amore, 2025).

Il gemello digitale integra anche la simulazione delle condizioni di stress sismico (illuminazione con effetto di sfarfallio, audio spazializzato, vibrazione aptica del banco) che riproducono con realismo controllato l'esperienza percettiva del terremoto. Il con-

retto di realismo controllato è cruciale: l'obiettivo non è riprodurre il panico, ma generare il livello di attivazione sufficiente a costruire risposte procedurali robuste (Rajabi, Taghaddos and Zahrai, 2022; Hettinger and Riccio, 1992). La tracciabilità dei dati di sessione, gestita attraverso un sistema di registrazione e aggiornamento, risponde anche alle esigenze di certificazione dei percorsi formativi (Peruccio, Liboni and Mucchetti, 2025).

Progettazione dell'esperienza: il Game Design Document

Il progetto esperienziale dell'ILE è formalizzato in un Documento di Progettazione dell'Esperienza che articola la struttura narrativa, le meccaniche di interazione, le regole di progressione e i criteri di valutazione dell'esperienza (Fig. 9). L'esperienza è organizzata in due livelli sequenziali, con un terzo livello di valutazione che attraversa entrambi (Fig. 10).

Il primo livello, denominato Life Saving, ha come obiettivo la comprensione del sistema Life Saving Furniture System: logica strutturale, relazione tra i componenti, zone di protezione e sequenze procedurali corrette. L'utente esplora liberamente l'aula virtuale guidato da visualizzazioni diegetiche ed esplicative (Fig. 11). L'approccio si ispira al concetto di apprendimento trasformativo di Zehr Gantz et alii (2025): l'utente percorre un itinerario di risposta emotiva (curiosità e sorpresa per la funzione non evidente del banco) e riflessione critica che prepara l'azione procedurale del livello successivo, replicando la progressione teorizzata da Mezirow (1997) tra esperienza disorientante, riflessione critica e ridefinizione delle prospettive di significato.

Il secondo livello, denominato Earthquake Simulation, è la simulazione immersiva del terremoto (Fig. 12). La progressione degli stimoli sensoriali – vibrazione del banco fisico, audio spaziale, sfarfallio dell'illuminazione – genera il livello di attivazione necessario per testare la risposta procedurale in condizioni di stress controllato. L'utente deve eseguire la sequenza corretta: avvicinarsi al banco, assumere la postura protettiva, mantenere la posizione per la durata della scossa, eseguire la verifica post-evento. Il principio del 'disagio costruttivo', inteso come attivazione controllata utile alla formazione procedurale (Zehr Gantz et alii, 2025), è strutturale a questo livello: la simulazione genera deliberatamente un disagio cognitivo ed emotivo controllato

che attiva risposte comportamentali autentiche (Chittaro and Buttussi, 2015).

Il ciclo di introduzione e restituzione finale, ispirato ai protocolli documentati nella letteratura sui serious game per l'emergenza (Lovreglio et alii, 2018; Feng et alii, 2020), completa la struttura esperienziale. La fase di restituzione finale, con la visualizzazione dei dati di sessione (quali la riproduzione della simulazione, le metriche e il confronto con il valore di riferimento), costituisce la fase chiave in cui si costruisce la riflessione critica sull'esperienza vissuta, consolidando la memoria procedurale e identificando gli ambiti di miglioramento.

Il modello ibrido fisico-digitale

La validazione dell'ILE si avvale di un modello ibrido fisico-digitale che combina un prototipo Life Saving Furniture System a scala reale installato in un'aula scolastica con il corrispondente gemello digitale ricostruito in VR a 360° in scala 1:1, garantendo coerenza geometrica, percettiva e interattiva tra le due dimensioni. La natura del modello sperimentale non è puramente strumentale, ma è, come documentato da Davidová, Barath e Dickinson (2023), un prototipo simultaneamente strumento di ricerca e dispositivo formativo. Questa doppia natura consente di raccogliere dati su dimensioni che una simulazione puramente virtuale non può catturare: la resistenza materiale del banco, le qualità tattili delle superfici, il peso e l'inerzia dei componenti mobili.

Le sessioni prevedono un'interazione alternata tra il Life Saving Furniture System fisico e l'addestramento immersivo in VR; in questa fase pilota il modello ibrido è stato impiegato in un contesto controllato, articolato in tre aree funzionali: area del prototipo fisico LSFS, area di simulazione immersiva con visore e area di introduzione e restituzione finale. Una sessione tipo si articola in: 1) introduzione contestuale, della durata di 10 minuti; 2) esplorazione libera del Life Saving Furniture System fisico senza guida, 5 minuti; 3) livello Life Saving in VR, 5 minuti; 4) ritorno al banco fisico con guida AR, 5 minuti; 5) livello Earthquake Simulation in VR con feedback aptico, 2 minuti; 6) restituzione finale con visualizzazione dei dati, 10 minuti (Fig. 13). In questa fase la finalità della sperimentazione non è ancora la validazione comparativa su larga scala, bensì la verifica della comprensibilità del sistema, della coerenza tra componente fisica e componente di-

gitale e della praticabilità del protocollo di osservazione. L'alternanza fisico-virtuale-fisico costituisce, nell'approccio 'phygital' documentato da Franzo, Quartu e Tufarelli (2025), la struttura ottimale per la costruzione di competenze procedurali ibride che resistono al trasferimento tra contesti.

Protocollo di validazione e metriche | Il protocollo di validazione formulato risponde a tre domande di ricerca: l'ILE migliora le prestazioni comportamentali rispetto alla prevenzione tradizionale? I miglioramenti si mantengono nel tempo (ritenzione a 1 e 3 mesi)? Il profilo di usabilità e comfort è adeguato all'impiego sistematico nelle scuole?

Il protocollo complessivo della ricerca prevede tre condizioni sperimentali e quattro tempi di misurazione; il presente contributo riporta tuttavia la sola fase pilota, finalizzata a verificare la comprensibilità del sistema, la coerenza del modello ibrido e la praticabilità del protocollo di osservazione; tale distinzione è essenziale per interpretare correttamente la portata delle evidenze presentate.

Il protocollo combina metriche quantitative di performance comportamentale con indicatori qualitativi di usabilità e comfort, seguendo un disegno misto pre e post ispirato ai protocolli documentati nella letteratura sui giochi formativi immersivi per l'emergenza (Rajabi, Taghaddos and Zahrai, 2022; Feng et alii, 2020) e ai quadri di valutazione di Zehr Gantz et alii (2025), ma orientato, nella presente fase pilota, alla verifica esplorativa della tenuta del sistema e del protocollo, più che alla misurazione inferenziale di effetti comparativi.

Le metriche comportamentali primarie sono: a) tempo di reazione misurato come intervallo tra l'attivazione dello stimolo sismico e l'inizio del movimento verso il banco; b) correttezza posturale valutata mediante uno score composito su scala 0-100 costruito sulla congruenza tra postura osservata e postura attesa rispetto a tre parametri: protezione del capo e della nuca, raccolta del corpo entro la zona protetta e mantenimento della posizione per la durata richiesta; c) traiettorie intese come coerenza del percorso compiuto rispetto alla configurazione spaziale dell'aula e alla posizione del banco; d) correttezza delle decisioni verificata confrontando la sequenza delle azioni eseguite con la sequenza prevista dal protocollo esperienziale.

Gli indicatori di usabilità e comfort includono la scala di usabilità del sistema (System Usability Scale) adattata per la realtà virtuale, una scala di comfort per la locomozione virtuale, il questionario sul malessere da simulazione (Simulator Sickness Questionnaire) pre e post sessione (Hettinger and Riccio, 1992; Keshavarz, 2016), un questionario sul coinvolgimento e indicatori di presenza somatica, nonché osservazioni guidate e domande aperte finalizzate a rilevare comprensibilità, chiarezza dell'interfaccia, comfort percepito ed eventuali criticità. Tutti gli strumenti sono adattati per fasce d'età diverse (versione adulti / insegnanti e versione studenti). In questa fase pilota il trattamento dei dati combina l'analisi descrittiva degli indicatori quantitativi e la lettura qualitativa, con codifica tematica, delle risposte aperte.

Sono previste tre condizioni sperimentali: 1) formazione tradizionale senza ILE; 2) ILE autonomo; 3) ILE con modello ibrido completo. Le misurazioni si svolgono in quattro tempi: pre-test, post-test immediato e verifica successiva a 1 mese e a 3 mesi, in conformità con le procedure di consenso infor-

mato, anonimizzazione dei dati e con la normativa GDPR applicabile.

In questa prima fase le tre condizioni sperimentali costituiscono il quadro di riferimento del protocollo complessivo, mentre la sperimentazione pilota si concentra sulla verifica del sistema ILE con modello ibrido, al fine di testarne l'intelligibilità, la coerenza operativa e il potenziale applicativo. Il campione è composto da 30 studenti del Corso di Disegno Industriale dell'Università di Camerino. Tale scelta, non coincidente con la popolazione scolastica target, risponde a una finalità esplorativa: raccogliere osservazioni qualificate sulla leggibilità del sistema, sull'esperienza d'uso e sui margini di miglioramento dell'interazione. I risultati vanno pertanto interpretati come preliminari e non generalizzabili. La raccolta dei dati è stata impostata in forma non identificativa, mediante l'anonimizzazione delle risposte e la registrazione dei soli indicatori necessari alla valutazione pilota.

Risultati preliminari e discussione | La validazione pilota è stata condotta presso l'ITT Fermi Sacconi Ceci di Ascoli Piceno e presso la Scuola di Ate-neo di Architettura e Design 'Eduardo Vittoria' dell'Università di Camerino, con trenta studenti del corso di Disegno Industriale. Il campione pilota non è rappresentativo della popolazione scolastica target: la scelta di studenti universitari di Disegno Industriale è stata motivata dalla loro capacità di fornire feedback qualificati su aspetti della progettazione dell'esperienza; il gemello digitale mira a replicare dimensioni, materiali, colori del prototipo fisico (Fig. 14), mentre il modello integrato è stato configurato con tre zone funzionali: zona prototipo fisico, zona VR con visori immersivi e zona introduttiva.

Il questionario post-sessione ha fornito evidenze su quindici item Likert e cinque domande aperte. La chiarezza delle istruzioni ha ottenuto una media di 4,2/5; l'usabilità dell'interfaccia 4,1/5; le visualizzazioni esplose 4,5/5; la comprensione dell'importanza della postura corretta 4,6/5; mentre l'85% degli studenti non ha riportato sintomi di disagio da immersione, il 15% ha riportato sintomi lievi rapidamente regrediti. I dati automatici del sistema hanno registrato tempi di reazione medi di 4,2 secondi tra l'allerta iniziale e l'inizio del movimento verso il banco, con correttezza posturale durante la fase intensa dell'87% del tempo.

I suggerimenti emersi dalle domande aperte riguardano l'estensione a scenari aggiuntivi, una maggiore articolazione delle dinamiche di gamification, l'introduzione di modalità multiutente e alcuni miglioramenti tecnici relativi all'illuminazione, all'audio e al feedback aptico. La restituzione finale con visualizzazione dei dati è stata percepita dagli utenti come il momento formativo più significativo dell'esperienza, in accordo con i principi dell'apprendimento trasformativo documentati da Zehr Gantz et alii (2025). Tali evidenze devono tuttavia essere lette in chiave preliminare, poiché lo studio pilota consente di verificare la comprensibilità del sistema, la coerenza tra le componenti fisiche e immersive e il potenziale del protocollo, ma non consente ancora di formulare conclusioni generalizzabili sulla sua efficacia comparativa rispetto ai metodi di formazione tradizionali.

Limiti, barriere all'adozione, trasferibilità e scalabilità | Il presente studio presenta evidenti limiti che è necessario riconoscere esplicitamente: il

campione pilota è limitato per dimensione ($n < 40$) e geograficamente circoscritto; pertanto, la generalizzabilità richiede studi di replicazione su campioni più ampi e distribuiti. Sul piano tecnico la principale criticità riguarda l'ottimizzazione per dispositivi a bassa soglia tecnologica: il flusso operativo di modellazione è ottimizzato per visori di fascia media (Meta Quest 2/3) e il processo di trasposizione verso smartphone con visori di fascia base introduce inevitabilmente degradazioni percettive che limitano l'efficacia del feedback posturale, traducendosi in una barriera di accesso per le scuole con budget ridotti (D'Amore, 2025; Valenti et alii, 2025).

Le dinamiche sociali e collaborative rimangono insufficientemente sviluppate: la simulazione sismica di gruppo, con dinamiche di panico o di affidamento a una figura guida (Lin et alii, 2020), richiede un'architettura tecnica e narrativa più complessa, attualmente non implementata.

Sul piano della sostenibilità istituzionale la scalabilità del sistema alle scuole richiede affrontare barriere che vanno oltre il design del prodotto: competenze di gestione tecnologica negli Istituti, protocolli di manutenzione degli asset digitali, aggiornamento periodico dei contenuti, gestione della privacy dei dati di sessione degli studenti minorenni. Come documentato da Peruccio, Liboni e Mucchetti (2025) e da Giachetta e Buondonno (2024), le resistenze istituzionali all'adozione di innovazioni tecnologiche nei contesti educativi hanno radici strutturali che nessun prodotto, per quanto ben progettato, può risolvere autonomamente.

In questo senso i risultati qui discussi devono essere interpretati come evidenze esplorative utili a orientare la successiva fase di validazione, non come conferma definitiva dell'efficacia del sistema. La trasferibilità del modello richiederà verifiche su campioni più ampi, fasce d'età differenti, contesti scolastici diversificati e condizioni d'uso meno controllate.

Oltre ai limiti propri della fase pilota l'adozione del sistema in contesti scolastici reali incontra barriere che eccedono il piano strettamente progettuale. Tra queste rientrano il costo e la manutenzione delle dotazioni tecnologiche, la disponibilità di personale formato, l'aggiornamento dei contenuti digitali, la gestione della privacy dei dati di sessione e le procedure di consenso nei casi che coinvolgono studenti minorenni. A tali fattori si aggiungono possibili resistenze culturali e istituzionali nei confronti di dispositivi immersivi, percepiti come complessi o onerosi rispetto alle routine scolastiche consolidate.

La trasferibilità del modello LSFS-ILE dipende da condizioni di validità che devono essere esplicitate. Il sistema appare più facilmente trasferibile in contesti scolastici dotati di una minima infrastruttura digitale e di spazi idonei all'allestimento del prototipo e delle sessioni immersive. La sua trasferibilità varia inoltre in relazione al tipo di scuola, all'età degli utenti, alla disponibilità tecnologica, ai costi di manutenzione, alle competenze del personale e ai requisiti di privacy. Il modello richiede infine adattamenti a diversi contesti sismici, profili di utenza e livelli di risorse economiche e organizzative. In questa prospettiva la scalabilità non va intesa come mera replicazione tecnica, ma come un processo di adattamento guidato da criteri di accessibilità, sostenibilità, privacy e manutenzione; la Tabella 1 sintetizza le principali variabili che incidono sulla trasferibilità del modello LSFS-ILE.

Contributo agli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile

Il progetto si colloca all'intersezione di quattro Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDG), attivando sinergie che ne amplificano l'impatto. Per l'SDG 9 l'ILE è concepito come infrastruttura digitale e non come prodotto, con implicazioni in termini di governance, manutenzione e interoperabilità. L'adozione dello standard ISO/IEC 9234:2025 e l'integrazione tra arredo fisico, gemello digitale e protocollo formativo definiscono un sistema innovativo coerente, replicabile e governabile nel tempo. Per l'SDG 10 il progetto affronta l'accesso alla sicurezza sismica come questione di giustizia spaziale, prevedendo una scalabilità da soluzioni PC VR ad alta fedeltà a dispositivi smartphone con contenuti 360°, così da consentire un accesso graduato anche in contesti con risorse limitate.

Per l'SDG 4 l'ILE democratizza strumenti avanzati di formazione alla sicurezza attraverso un ciclo fisico-virtuale-fisico e una struttura modulare adattabile a diverse fasce d'età, con un protocollo di validazione orientato alla trasferibilità delle evidenze: l'efficacia formativa rafforza l'equità nella capacità di risposta al rischio. Per l'SDG 11 il progetto contribuisce alla resilienza delle comunità scolastiche nelle aree sismiche, estendendo la resilienza dal piano strutturale a quello comportamentale. Il design del Life Saving Furniture System come arredo ordinario integra la sicurezza nell'ambiente di apprendimento, generando effetti moltiplicatori su famiglie e territorio.

In modo indiretto il progetto intercetta anche gli SDG 3 e 13, attraverso la riduzione del rischio e dei suoi impatti sulla salute pubblica, nonché l'SDG 17, per la sua natura collaborativa e interuniversitaria. Il principale compromesso riguarda il rapporto tra ambizione tecnologica e sostenibilità istituzionale: una maggiore sofisticazione implica maggiori esigenze di competenze e risorse, richiedendo politiche di formazione, investimenti pubblici e standard condivisi.

In termini più ampi il contributo attiva effetti diretti soprattutto rispetto agli SDG 4, 9 e 11, mentre il riferimento all'SDG 10 va motivato in relazione all'accessibilità economica dei dispositivi, alla possibilità di adozione in scuole collocate in aree interne o fragili e alla riduzione delle asimmetrie territoriali nell'accesso a strumenti avanzati di formazione alla sicurezza. Rispetto all'insieme degli SDG 1-17 il progetto non produce ricadute uniformi, ma una costellazione selettiva di effetti diretti, indiretti, sinergie e compromessi. Tra le sinergie indirette si possono richiamare il benessere e la salute pubblica, la riduzione del rischio e la cooperazione istituzionale; tra i compromessi emergono invece i costi tecnologici, i requisiti di manutenzione, le esigenze di formazione del personale e le questioni di gestione dei dati. In tal senso la coerenza con gli SDG dichiarati va intesa non in forma astratta, ma come relazione condizionata dalla disponibilità di risorse, competenze, infrastrutture e politiche di accompagnamento.

Discussione critica e direzioni future | Il contributo ha presentato lo sviluppo, l'architettura e la validazione preliminare di un Immersive Learning Environment concepito come infrastruttura digitale sociotecnica a supporto del Life Saving Furniture System. L'interesse principale della ricerca non risiede soltanto nell'impiego di tecnologie immersive per la prevenzione sismica, ma anche nel tentativo

di integrare oggetto fisico, spazio, simulazione e apprendimento in un unico dispositivo progettuale e sperimentale. I dati raccolti nello studio pilota suggeriscono che il sistema presenta una buona intelligibilità d'uso, un profilo di usabilità positivo e una promettente capacità di orientare comportamenti procedurali coerenti durante la simulazione. Tali evidenze non autorizzano ancora conclusioni generalizzabili né un confronto pienamente dimostrato con i metodi formativi tradizionali: più che confermare in via definitiva l'ipotesi di ricerca, i risultati ne suggeriscono la plausibilità e la necessità di ulteriori verifiche. La principale novità del contributo non è tecnica ma concettuale e metodologica: il posizionamento dell'ILE come infrastruttura digitale abilitante dell'innovazione, e non come strato formativo aggiuntivo, consente infatti di leggere l'apprendimento immersivo come parte costitutiva dei sistemi di sicurezza complessi.

Sul piano teorico questo spostamento ridefinisce il ruolo dell'apprendimento nel ciclo di vita dei prodotti di sicurezza, mettendo in relazione oggetto, spazio, comportamento e mediazione digitale. Sul piano metodologico la ricerca mostra il potenziale del ciclo fisico-virtuale-fisico come dispositivo capace di connettere prototipazione, riscontro operativo, valutazione e riflessione critica, integrando gemello digitale, gestione dei contenuti e governance dei dati di sessione (D'Amore, 2025; Valenti et alii, 2025). Sul piano applicativo il lavoro apre una prospettiva trasferibile ad altri contesti in cui il design è chiamato a sostenere comportamenti corretti in condizioni di rischio, purché siano chiarite le condizioni organizzative, tecnologiche ed etiche della sua implementazione.

Gli sviluppi futuri si articolano lungo più direttrici convergenti: una prima direzione riguarda l'ampliamento del campione di validazione, il coinvolgimento diretto della popolazione scolastica target e la replicazione in contesti scolastici diversificati per tipologia edilizia, fascia d'età e area geografica; la seconda riguarda lo sviluppo della dimensione collaborativa dell'ILE poiché modalità di simulazione collettiva aprono scenari di ricerca pedagogicamente rilevanti e consentono di osservare più compiutamente le dinamiche interattive fra utenti, ambiente e dispositivo (Davidová, Barath and Dickinson, 2023); la terza riguarda l'integrazione di metriche più robuste, tra cui misure psicofisiologiche nel protocollo di valutazione, al fine di calibrare con maggiore precisione l'intensità dell'esperienza e la qualità delle risposte procedurali (Rajabi, Taghados and Zahrai, 2022).

In questa prospettiva il sistema LSFS-ILE può essere considerato non un esito concluso, ma una piattaforma di ricerca aperta, utile a potenziare il dibattito sul rapporto tra design, sicurezza, apprendimento e infrastrutture digitali e a esplorare modelli trasferibili per la trasformazione dei comportamenti in condizioni di emergenza (Franzo, Quartu and Tufarelli, 2025; Valenti et alii, 2025; D'Amore, 2025).

In areas of high seismic risk, school safety depends not only on the structural performance of buildings, but also on occupants' ability to recognise and correctly use protective devices and operational procedures. Technical innovation remains fragile when it is not easily recognised in everyday use and

cannot be readily transferred across different contexts and user groups (Pietroni, Mascitti and Galloppo, 2021). The issue is not purely technical. It concerns, on the one hand, the mediation between artefact, body, and space, and on the other, the conditions that enable correct and timely action under controlled stress, in line with studies showing that earthquake behaviour is shaped by situational, perceptual, and contextual factors (Alexander, 1990).

With this in mind, the contribution presents the Life Saving Furniture System (LSFS), a protective furniture system for school environments developed within the Vitality programme (Spoke 6, WP3). The system is intended to guide postures and behaviours during a seismic event through a coordinated set of furniture elements that integrate protective and educational functions (Pietroni, Mascitti and Galloppo, 2021; Pietroni et alii, 2025; Fig. 1). The research hypothesis is that immersive learning, when integrated into the design process, is not to be understood as an additional layer of training, but as a component of the innovation itself, capable of reducing interpretative ambiguity, strengthening procedural memory, and making the relationship between body, furniture, and space legible under conditions of controlled stress. From this perspective, the Immersive Learning Environment (ILE) is not an accessory to the LSFS, but its enabling digital infrastructure, conceived as a system that relates objects, space, content, and learning processes within a framework of increasing digital design complexity (Valenti et alii, 2025; Davidová, Barath and Dickinson, 2023; Nava and Melis, 2024).

In light of these premises, the contribution addresses a twofold research gap: on the one hand, the limited integration between physical protection devices, procedural learning, and digital infrastructure for seismic preparedness; on the other, the lack of experimental protocols capable of coherently connecting the physical object, its digital twin, and behavioural assessment under controlled stress conditions. Accordingly, the contribution proposes an advancement on three levels: at the level of the object, through the Life Saving Furniture System; at the level of the system, through the Immersive Learning Environment, understood not as an accessory support but as a socio-technical learning infrastructure; and at the methodological level, through the physical-virtual-physical cycle, the development of the digital twin, and the pilot validation protocol. The contribution is structured in five parts: state of the art, system description, methodology, preliminary results and critical discussion, and limitations and future developments.

State of the art: seismic preparedness, immersive training games, and constraints of human-computer interaction

Seismic prevention training through immersive environments is a rapidly evolving field. Early applications of Virtual Reality (VR) for evacuation training have shown the greater effectiveness of immersive training games compared to traditional methods, both in consolidating procedural learning and in promoting more timely behavioural responses (Chittaro and Buttussi, 2015; Chittaro and Sioni, 2015). This advantage is supported by two meta-analyses by Sitzmann (2011). The first, based on 65 studies, reports a 14% increase in procedural learning and an 11% increase in declarative learning compared to conventional methods. The second, based on 77 stud-

ies, confirms significant effects on cognitive processes and intrinsic motivation.

In the same vein, the meta-analysis by Wouters et alii (2013) shows that training games produce positive cognitive and motivational effects, particularly when they consistently integrate learning objectives, interaction, and feedback. More recently, systematic reviews by Scorgie et alii (2024), Stefan, Mortimer, and Horan (2023) and Kagawa et alii (2025) confirm the consolidation of virtual reality as a tool for safety training and emergency preparedness, highlighting its potential but also the need for further verification of cost, accessibility, user safety, and more homogeneous and comparable evaluation protocols. The review by Feng et alii (2018) documents a growing body of studies highlighting the potential of these tools to produce lasting changes in emergency response behaviours; a subsequent study by the same authors (Feng et alii, 2020) empirically demonstrates that an immersive virtual reality training game environment improves both behavioural responses during an earthquake and post-event prevention.

In the field of earthquake prevention, Li et alii (2017) validate a training system using virtual drills with significant improvements in response times; Lovreglio et alii (2018) prototype a VR system for training in hospital buildings; Xu et alii (2019) pro-

pose a method of constructing virtual earthquake damage scenes for internal non-structural components aimed at developing virtual earthquake safety drills; Rajabi, Taghaddos, and Zahrai (2022) integrate anxiety assessment metrics by introducing a psychophysiological dimension; Lin et alii (2020) investigate group dynamics in cross-cultural VR evacuation. Similarly, recent literature reviews on indoor evacuation show how virtual reality is taking on an increasing role not only as a simulation environment, but also as a tool for design and data collection in emergency contexts (Liu and Liu, 2024; Hung, Lin and Hsiao, 2025). The pedestrian evacuation models of Bernardini, Quagliarini and D’Orazio (2016) provide the quantitative framework to calibrate the ILE simulation parameters. In parallel, commercial applications such as Earthquake Simulator VR¹ reflect a growing social demand for this type of tool and anticipate interaction design solutions later adopted in more structured training contexts.

Reference cases and good practices | A brief comparison of selected international cases helps clarify the positioning of this contribution. The reference cases under consideration were selected according to four criteria: relevance to seismic preparedness, use of immersive technologies, pres-

ence of behavioural or evaluative metrics, and relevance to the development of replicable training protocols. A first significant case is Rajabi, Taghaddos and Zahrai (2022), who develop an immersive environment for earthquake safety training in a classroom, comparing traditional education with virtual reality-mediated education and introducing an anxiety assessment dimension. The work’s strength lies in its relevance to the school context and in the integration of procedural learning with psycho-physiological indicators; its main limitation lies in the more limited attention to the relationship between the physical device, space, and behaviour.

Feng et alii (2020), proposing an immersive training system aimed at improving behavioural responses during earthquakes and post-event preparedness, represents a second relevant case. The main advantage lies in the ability to integrate the immersive environment, learning objectives, and the verification of training outcomes; a key limitation is the primary focus on simulation and user behaviour, rather than on integration with a physical device designed as a mediator of protective action.

A third useful reference case is Lovreglio et alii (2018), developed in a hospital setting, which addresses the prototyping of a virtual reality system for seismic preparedness. The contribution is valuable for the clarity with which it defines the design



Fig. 6 | Photo collage of experiments with the AR module: posture studies and reverse engineering of the LSFS bench, including collaborative in-situ sessions (credit: the Authors, 2025).



Fig. 7 | Processing of the point cloud acquired by the Leica BLK360 G1 laser scanner: two screenshots of the Leica Cyclone Register 360 software used to process data from the survey of the sample classroom at the 'Fermi Sacconi Ceci' ITT (credit: the Authors, 2025).

Next page

Fig. 8 | Four views of the Rhinoceros 6 and Blender 2.91.1 software used to build the virtual model of the sample classroom at the 'Fermi Sacconi Ceci' ITT (credit: the Authors, 2025).

components of the immersive system and the representation of the event; at the same time, it remains tied to a non-school context and does not connect immersive training to a life-saving furniture system.

Compared to these experiences, this contribution stands out for its attempt to bring together the LSFS, the Immersive Learning Environment, the digital twin of the classroom, and a pilot validation oriented towards transferability within a single framework. This picture is further confirmed by recent literature reviews, which recognise the growing role of virtual reality in safety training and emergency preparedness in evacuation and risk management contexts, while also pointing to the need for more robust evaluation protocols, clearer comparisons between training conditions, and long-term measurements of learning retention (Scorgie et alii, 2024; Stefan, Mortimer and Horan, 2023; Liu and Liu, 2024; Hung, Lin and Hsiao, 2025).

From this perspective, the cases examined confirm the solidity of the research field and make the originality of the present work more legible in terms of the integration of the object, digital infrastructure, and methodological protocol.

The concept of the 'digital twin' applied to built environments has evolved significantly. D'Amore (2025) proposes a three-component architecture – physical space, virtual counterpart and two-way bridge – as a framework for integrating the digital twin into the building process. Wang et alii (2026) show how recent digital technologies for emergency preparedness in buildings tend to take the form of integrated ecosystems, in which virtual reality, augmented reality, BIM, sensors, and digital twins work together to support more responsive, emergency management-oriented environments.

Training through hybrid physical-digital environments finds a theoretical framework in the concept of physical-digital (phygital) learning developed by Franzo, Quarto and Tufarelli (2025): the digital twin does not simply simulate the object, but co-produces competent behaviour through interaction with its real counterpart. Giachetta and Buondonno (2024) document how immersive tools produce measurable cognitive effects distinct from mental prefiguration; Vacanti et alii (2025) propose the concept of techno-temporal performance to describe the design of time in digital interaction; Zehr Gantz et alii (2025) show how environmental discomfort can act as an intentional pedagogical lever, amplifying the lasting impact of the learning experience, a structural principle of the ILE seismic simulation. The contribution by Davidová, Barath, and Dickinson (2023) on prototyping as a practice integrating research and training provides the methodological foundation for the dual nature of the hybrid model developed in this research.

The contribution in the context of the state of the art

Three elements emerge from the examined literature that are not yet fully integrated. The first concerns the relationship between physical protective devices and immersive environments: many studies analyse seismic event simulation or procedural training, but more rarely are these dimensions developed from a furniture system designed to guide protective behaviour within the school space. The second concerns the systemic scale of innovation: immersive environments are often treated as additional training tools, rather than as structural components of a socio-technical ecosystem capable of connecting object, space, data and learning. The third concerns the method-

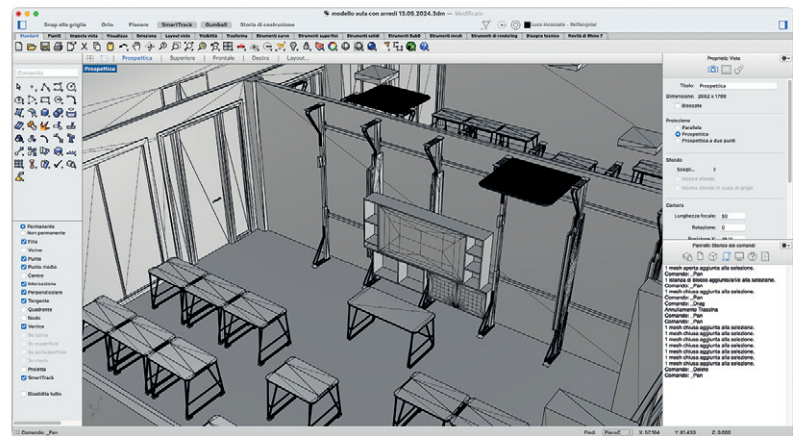
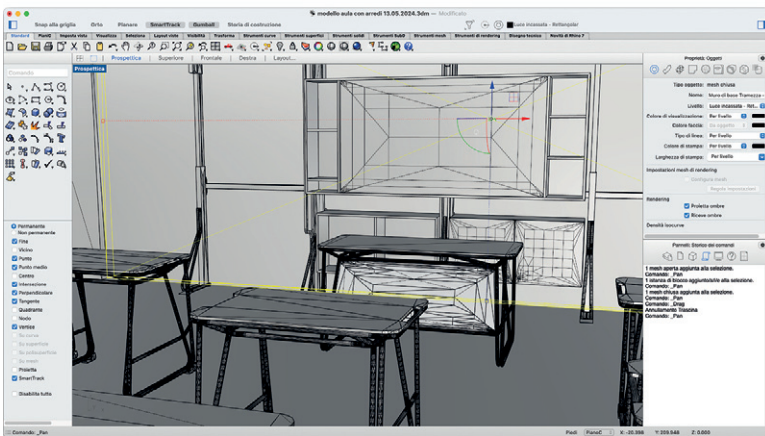
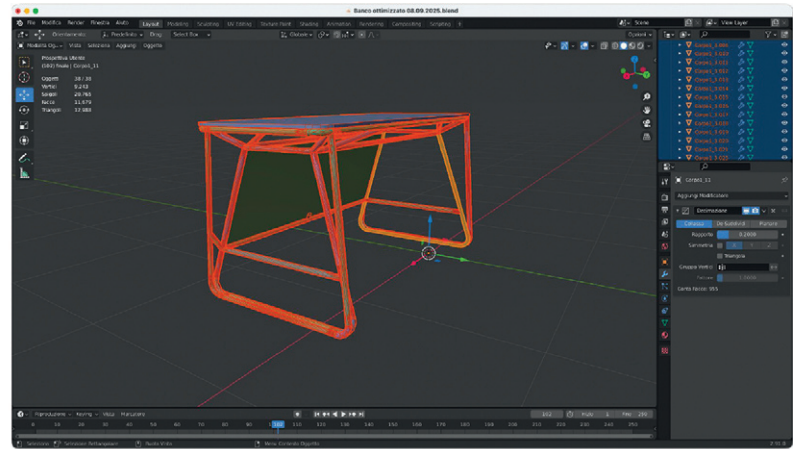
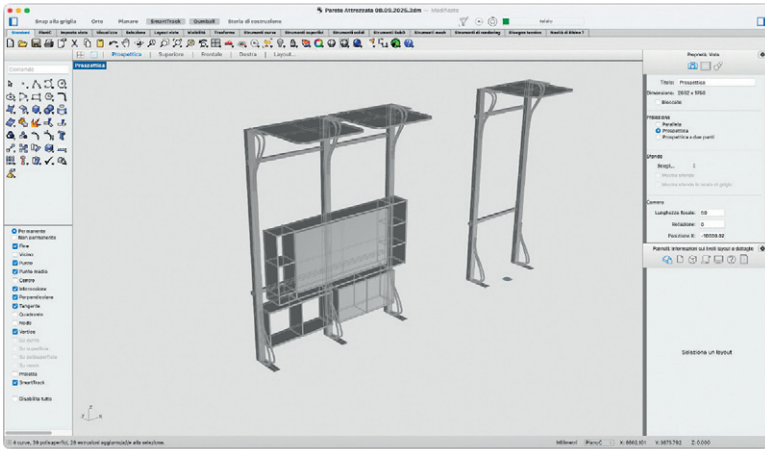
ological level: experiments combining physical prototypes, digital twins, real-time interaction, and transferability-oriented evaluation protocols remain limited.

Within this framework, the contribution defines its profile of originality on three levels. At the object level, the Life Saving Furniture System introduces a furniture system that integrates protective, educational, and ease-of-use functions. At the system level, the Immersive Learning Environment is conceived as an enabling socio-technical infrastructure, capable of linking the physical counterpart, its digital twin, immersive content, and learning processes. Methodologically, the research experiments with a physical-virtual-physical cycle that connects survey, modelling, simulation, operational feedback, and critical reflection within a single research-through-design framework, as summarised in the LSFS-ILE iterative development workflow (Fig. 2).

The Life Saving Furniture System

The Life Saving Furniture System is a protective furniture system for school environments in areas of high seismic risk in central Italy. Developed as part of the Vitality programme in response to the critical issues that emerged after the 2016-2017 earthquakes in Abruzzo, Lazio, Marche, and Umbria, it integrates protective, educational, and environmental functions (Pietroni, Mascitti and Galloppo, 2021; Pietroni et alii, 2025).

The system consists of a coordinated set of elements: the main protective desk (Fig. 3), designed to withstand the collapse load of non-structural elements and to guide correct posture (head down, arms protecting the nape of the neck, body tucked in) in accordance with international earthquake



prevention guidelines (Centers for Disease Control and Prevention, 2024); complementary seating and restraint elements; and connection and signalling components. The desk is equipped with sensors that, integrated into the digital twin, allow real-time monitoring during simulation.

The design peculiarity of the Life Saving Furniture System lies in resolving a structural contradiction: to be effective in an emergency, the system must be operable automatically, without requiring a deliberative process in a dangerous situation. This requires that training develop robust procedural memory rather than mere declarative knowledge: it is precisely to resolve this discontinuity that the ILE was designed. The Life Saving Furniture System is part of a tradition of research on design for collective security which, as documented by Valenti et alii (2025), requires addressing the scales of the object, architecture, and social system simultaneously.

Methodology: research through design and physical-virtual-physical cycle | The ILE adopts a modular architecture based on three integrated channels, designed to cover distinct phases and modes of use within the learning cycle, ensuring geometric, perceptual, and narrative coherence with the physical Life Saving Furniture System (Fig. 4). The first channel is the VR module for guided exploration and simulation. This is the experiential core of the ILE, whose operation is based on the principles of perception, interaction, and visualisation that define the architecture of virtual reality systems (LaValle, 2023). The user explores the reconstructed classroom in first person with the Life Saving Furniture System, understands the system through diegetic visualisations and explanatory

views, and performs the earthquake simulation with real-time postural feedback. The experience is structured in two levels, described in the experience design section.

The second channel is the 360° content for the initial introduction, micro-narratives and the comparison between real and virtual. Panoramic photographs and videos provide gradual access to the experience, which can also be enjoyed on simple devices (smartphones with low-cost visors), without requiring the full immersion of virtual reality. This channel is particularly relevant for pre-session preparation and post-simulation review (Franzo, Quartu and Tufarelli, 2025; Fig. 5).

The third channel is the Augmented Reality (AR) extension for in-situ posture study and installation verification. The AR application, which can be used on tablets or smartphones in real physical contexts, enables the visualisation of information overlays on the desk (indicators of correct posture, procedural sequences, structural logic of the system) and supports collaborative sessions in which groups of students or teachers work simultaneously in physical space (Fig. 6).

In support of all three channels, a centralised digital archive of content and texts, updated in a controlled manner, ensures consistency between the physical prototype and the digital content: each update to the Life Saving Furniture System is reflected across all digital channels through a process of updating digital resources (D'Amore, 2025; Peruccio, Liboni and Mucchetti, 2025). The architecture responds to the need to overcome the dichotomy between immersive spatial prefiguration and procedural control (Giachetta and Buondonno, 2024), integrating the two within the physical-virtual-physical cycle. The adoption of the ISO/IEC

9234:2025 standard ensures compliance with international requirements for the interoperability and portability of immersive content (ISO/IEC, 2025), which is essential for the transferability of the system to different school contexts (Valenti et alii, 2025; Canessa and Centanaro, 2024).

Architecture of the ILE ecosystem and construction of the digital twin | The digital twin of the classroom-LSFS system constitutes the technical pillar of the ILE, ensuring geometric, perceptual, and functional correspondence between the physical training environment and the virtual simulation environment. The process of creating the digital twin follows a three-step workflow. The first phase is the survey of the classroom, carried out through laser scanning and the acquisition of a high-density point cloud (Fig. 7); in parallel, the Life Saving Furniture System is captured through photogrammetry to produce a perceptually faithful model for VR. The second phase is 'modelling and optimisation': the raw model is processed for real-time use, reducing the number of polygons and optimising textures to ensure a stable refresh rate (Fig. 8). Maintaining geometric consistency between the high-fidelity model and the optimised model requires successive iterations of visual and metric verification. The third stage is sensory integration: the sensors integrated into the physical Life Saving Furniture System are connected to the virtual model via a two-way link architecture, allowing real-time feedback.

Although not yet fully implemented in the current pilot phase of the ILE, the real-time data flow between the physical furniture and the virtual model is designed as follows: sensors transmit posture and proximity data to an intermediate data man-

agement system that translates them into signals readable by the VR engine; the digital twin updates the visualisation of the user's virtual representation by generating visual feedback (colour variations and overlapping visual indicators) on the correctness of the position; data are recorded in a time log for the construction of post-session metrics. This two-way flow, from the physical to the virtual for postural feedback and from the virtual to the physical for simulation intensity modulation, enables the bridging function in the three-component model of the digital twin (D'Amore, 2025).

The digital twin also integrates the simulation of seismic stress conditions (flickering lighting, spatialised audio, haptic vibration of the desk) that reproduce the perceptual experience of an earthquake with controlled realism. The concept of controlled realism is central: the goal is not to reproduce panic, but to generate a level of activation sufficient to support robust procedural responses

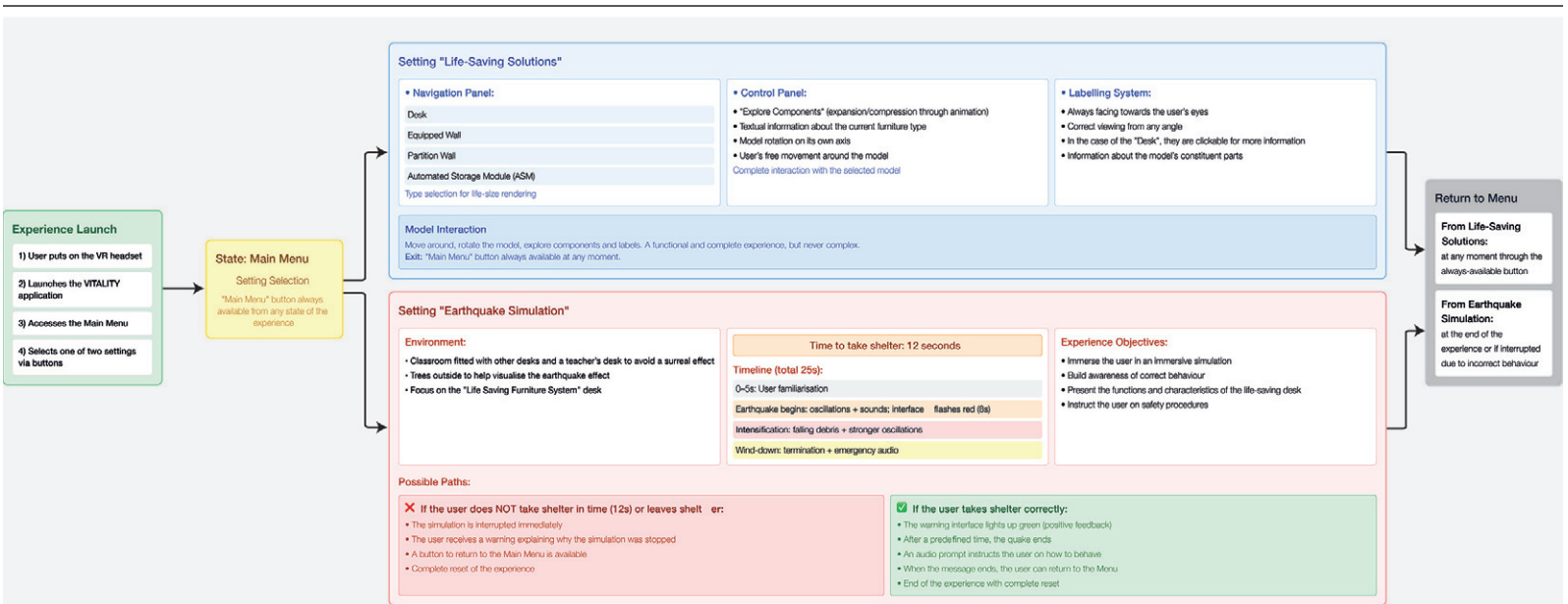
(Rajabi, Taghaddos and Zahrai, 2022; Hettinger and Riccio, 1992). The traceability of session data, managed through a recording and updating system, also meets the requirements for the certification of training courses (Peruccio, Liboni and Mucchetti, 2025).

Experience design: the Game Design Document | The ILE experiential design is formalised in an Experience Design Document that articulates the narrative structure, interaction mechanics, progression rules and evaluation criteria of the experience (Fig. 9). The experience is organised in two sequential levels, with a third level of evaluation running through both (Fig. 10).

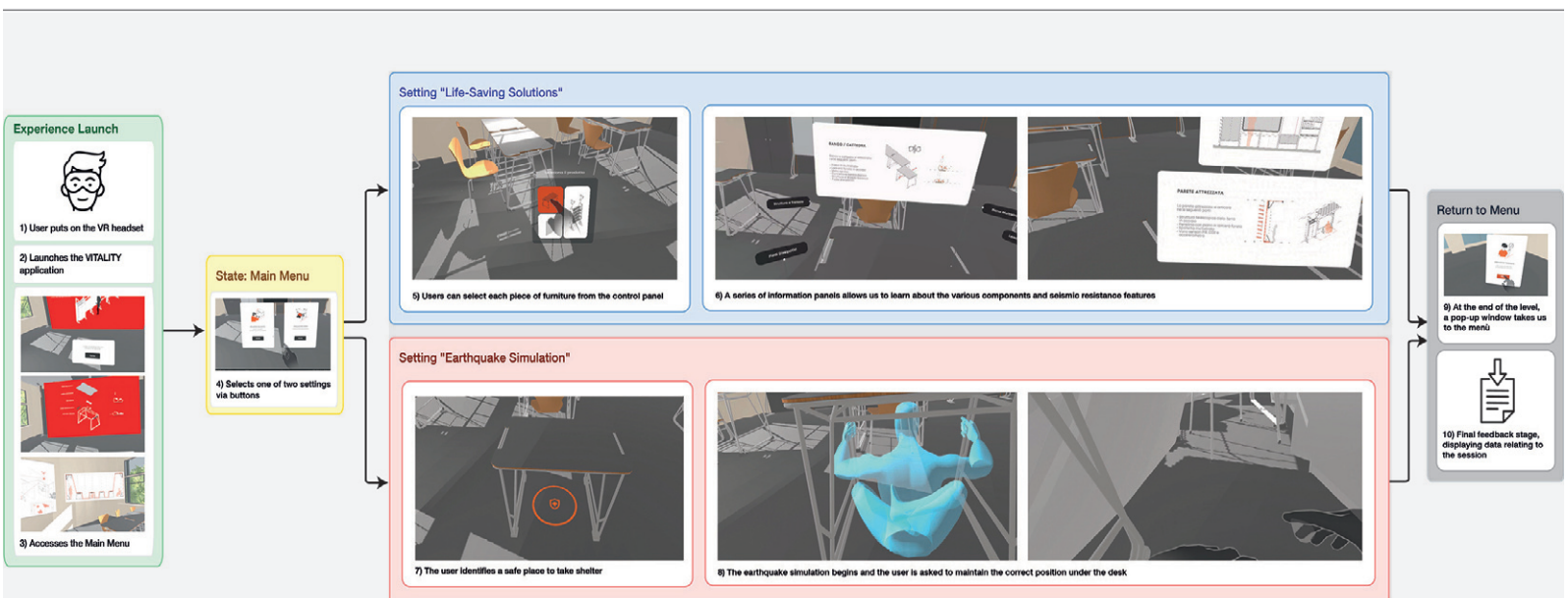
The first level, called Life Saving, aims at understanding the Life Saving Furniture System: structural logic, relationship between components, protection zones and correct procedural sequences. The user freely explores the virtual classroom guid-

ed by diegetic and explanatory displays (Fig. 11). The approach is inspired by the concept of transformative learning proposed by Zehr Gantz et alii (2025): the user moves through an itinerary of emotional response (curiosity and surprise at the non-obvious function of the desk) and critical reflection that prepares the procedural action of the next level, replicating the progression theorised by Mezirow (1997) between disorienting experience, critical reflection, and the redefinition of meaning perspectives. The second level, called Earthquake Simulation, is the immersive earthquake simulation (Fig. 12). The progression of sensory stimuli (vibration of the physical desk, spatial audio, flickering lighting) generates the level of activation required to test procedural responses under controlled stress conditions. The user must perform the correct sequence: approach the desk, assume the protective posture, maintain the position for the duration of the shock, and perform the post-event

ILE GAME DESIGN DOCUMENT



ILE GAME DESIGN DOCUMENT (VISUAL USERFLOW)



check. The principle of ‘constructive discomfort’, understood as controlled activation useful for procedural training (Zehr Gantz et alii, 2025), is structural at this level: the simulation deliberately generates controlled cognitive and emotional discomfort that activates authentic behavioural responses (Chittaro and Buttussi, 2015).

The cycle of introduction and debriefing, inspired by protocols documented in the emergency serious game literature (Lovreglio et alii, 2018; Feng et alii, 2020), completes the experiential structure. The debriefing phase, with the visualisation of session data (such as simulation playback, metrics, and comparison with the baseline), is the stage in which critical reflection on the lived experience is developed, consolidating procedural memory and identifying areas for improvement.

The hybrid physical-digital model | The validation of the ILE makes use of a hybrid physical-digital model that combines a full-scale Life Saving Furniture System prototype installed in a classroom with its corresponding digital twin reconstructed in VR at 360° on a 1:1 scale, ensuring geometric, perceptual, and interactive coherence between the two dimensions. The nature of the experimental model is not purely instrumental, but is, as documented by Davidová, Barath, and Dickinson (2023), a prototype that is simultaneously a research tool and a training device. This dual nature enables the collection of data on dimensions that a purely virtual simulation cannot capture: the material strength of the desk, the tactile qualities of its surfaces, and the weight and inertia of moving components.

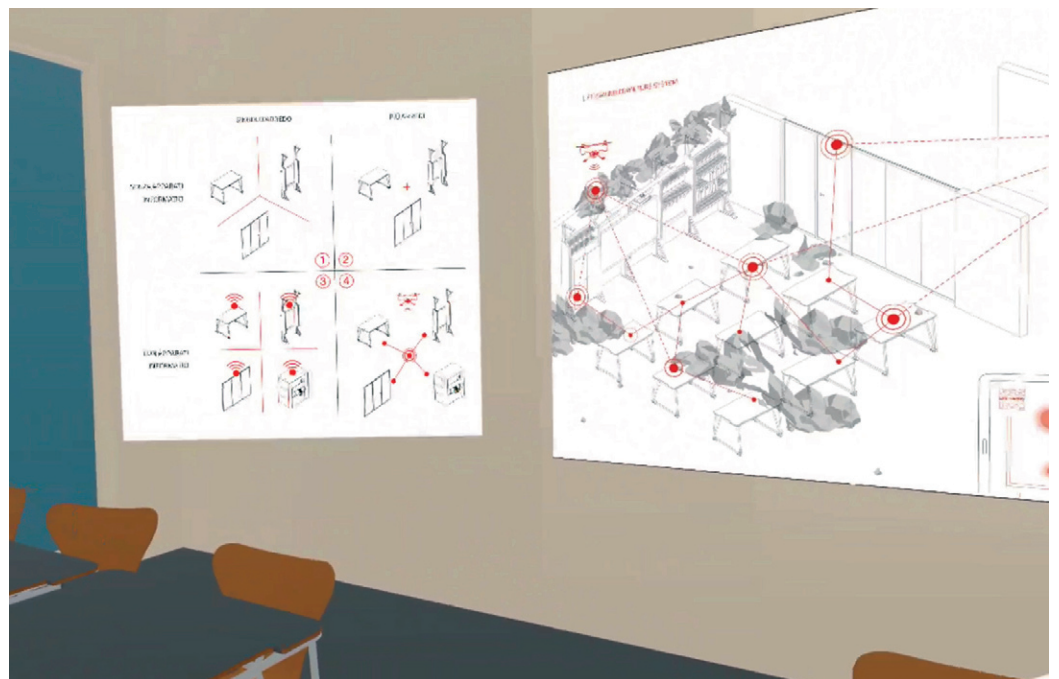
The sessions involve alternating between interaction with the physical Life Saving Furniture System and immersive VR training. In this pilot phase, the hybrid model was used in a controlled context, divided into three functional areas: the LSFS physical prototype area, the immersive simulation area equipped with a VR headset, and the introduction and debriefing area. A typical session consists of: 1) contextual introduction, lasting 10 minutes; 2) free exploration of the physical Life Saving Furniture System without guidance, 5 minutes; 3)

Life Saving level in VR, 5 minutes; 4) return to the physical desk with AR guidance, 5 minutes; 5) Earthquake Simulation level in VR with haptic feedback, 2 minutes; 6) debriefing with data visualisation, 10 minutes (Fig. 13). At this stage, the purpose of the experimentation is not large-scale comparative validation, but rather the verification of system comprehensibility, of the coherence between physical and digital components, and of the practicability of the observation protocol. The physical-virtual-physical alternation constitutes, in the ‘phygital’ approach documented by Franzo, Quartu, and Tufarelli (2025), an effective structure for the development of hybrid procedural competences that transfer across contexts.

Validation protocol and metrics | The formulated validation protocol addresses three research questions: does ILE improve behavioural performance compared to traditional prevention? Are the im-

provements maintained over time (retention at 1 and 3 months)? Is the usability and comfort profile adequate for systematic use in schools? The overall research protocol includes three experimental conditions and four measurement points; however, this contribution reports only on the pilot phase, aimed at verifying system comprehensibility, the consistency of the hybrid model, and the practicability of the observation protocol. This distinction is essential for correctly interpreting the scope of the evidence presented.

The protocol combines quantitative metrics of behavioural performance with qualitative indicators of usability and comfort, following a mixed pre and post-design inspired by protocols documented in the literature on immersive training environments for emergency contexts (Rajabi, Taghaddos and Zahrai, 2022; Feng et alii, 2020) and by the evaluation frameworks of Zehr Gantz et alii (2025), but oriented, in the present pilot phase, towards ex-



Previous page

Fig. 9 | Flow diagram of the ILE VR 2.0 user experience: a synoptic table outlining scenarios, navigation mechanics, learning objectives, and the timeline of the seismic simulation (credit: the Authors, 2025).

Fig. 10 | Visual diagram of the ILE VR 2.0 user experience flow (credit: the Authors, 2025).

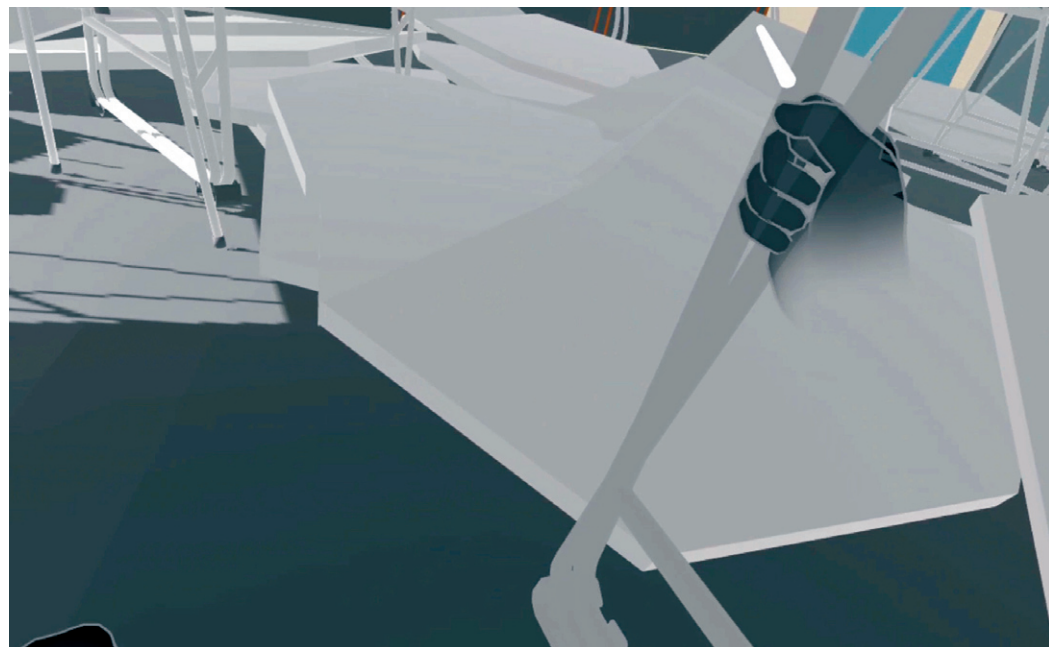


Fig. 11 | View extracted from Level 1 – Life-saving ILE: diegetic information panels on the LSFS integrated into the virtual classroom (credit: the Authors, 2025).

Fig. 12 | View of Level 2 – Earthquake Simulation in the ILE: the user adopts a protective posture beneath the LSFS bench during the seismic event, with dynamic non-structural elements and flickering illumination (credit: the Authors, 2025).



Previous page

Fig. 13 | Progression of the seismic simulation scenario within the ILE: the three views show successive states of non-structural damage, each rendered in dual viewing modes: first-person immersive and third-person observational perspectives (credit: the Authors, 2025).

Fig. 14 | Comparison between the real environment and its virtual counterpart within the ILE: the two juxtaposed views show the sample classroom and its digital replica from a similar perspective (credit: the Authors, 2025).

Tab. 1 | Variables affecting the transferability and scalability of the LSFS-ILE model (credit: the Authors, 2025).

Variable	Relevance	Main issues	Adaptation requirements
School type	High	Differences in spatial layout, furniture, school routines, and users' level of autonomy	Adaptation of protocol, contents, and degree of guidance
Users' age	High	Cognitive, motor, and attentional differences; different ability to understand and maintain procedures and protective postures	Calibration of language, session duration, interaction complexity, and stimulus intensity
Technological availability	High	Uneven hardware provision, lack of immersive devices, different device quality, and infrastructural limitations	Scalable system configuration, from full immersive solutions to 360° contents and low-threshold devices
Maintenance cost	Medium-High	Updating digital contents, device maintenance, technical assistance, and replacement of components	Scheduled maintenance cycles, standardized updates, and sustainable management models
Staff skills	High	Limited familiarity with immersive environments, training procedures, and data management	Dedicated training for teachers and technical staff, operational guidelines, and simplified protocols
Privacy requirements	High	Session data processing, involvement of minors, informed consent, and data storage and access	Data minimization, anonymization, consent procedures, and clear data governance
Seismic context	Medium-High	Differences in risk level, prevention practices, and local perception of emergency	Customization of scenarios, procedures, and simulation intensity according to the territorial context

ploratory verification of system and protocol robustness rather than the inferential measurement of comparative effects. The primary behavioural metrics are: a) reaction time, measured as the interval between the activation of the seismic stimulus and the start of movement towards the desk; b) postural correctness, assessed through a composite score on a 0-100 scale based on the congruence between observed and expected posture with respect to three parameters: protection of the head and nape of the neck, positioning of the body within the protected area, and maintenance of the posture for the required duration; c) trajectories, understood as the coherence of the path taken in relation to the spatial configuration of the classroom and the position of the desk; d) correctness of decisions, verified by comparing the sequence of actions performed with that envisaged by the experiential protocol.

The usability and comfort indicators include the System Usability Scale adapted for virtual reality, a comfort scale for virtual locomotion, the pre and post-session Simulator Sickness Questionnaire (Hettinger and Riccio, 1992; Keshavarz, 2016), an engagement questionnaire, and somatic presence indicators, as well as guided observations and open-ended questions aimed at assessing comprehensibility, interface clarity, perceived comfort, and any critical issues. All tools are adapted for different age groups (adult / teacher version and student version). In this pilot phase, data processing combines descriptive analysis of quantitative indicators and qualitative reading, with thematic coding, of open-ended responses. Three experimental conditions are envisaged: 1) traditional training without the ILE; 2) autonomous ILE; 3) ILE with the full hybrid model. Measurements are carried out at four stages: pre-test, immediate post-test, and follow-up tests at 1 month and 3 months, in accordance with informed consent procedures, data anonymisation, and applicable GDPR regulations.

In this first phase, the three experimental conditions define the overall protocol, while the pilot experiment focuses on testing the ILE system with a hybrid model in order to assess its intelligibility, operational consistency, and application potential.

The sample consists of 30 students from the Industrial Design course at the University of Camerino (Italy). This choice, which does not coincide with the target school population, serves an exploratory purpose: to gather informed observations on system readability, user experience, and opportunities to improve interaction. The results should therefore be interpreted as preliminary and not generalisable. Data collection was set up in a non-identifying manner by anonymising responses and recording only the indicators necessary for the pilot evaluation.

Preliminary results and discussion | The pilot validation was conducted at the ITT Fermi Sacconi Ceci in Ascoli Piceno and at the University of Camerino's 'Eduardo Vittoria' School of Architecture and Design, with thirty students from the Industrial Design course. The pilot sample is not representative of the target school population: the choice of university students of Industrial Design was motivated by their ability to provide informed feedback on aspects of experience design; the digital twin aims to replicate the dimensions, materials, and colours of the physical prototype (Fig. 14), while the integrated model was configured with three functional zones: physical prototype zone, VR zone with immersive headsets, and introductory zone.

The post-session questionnaire provided evidence on fifteen Likert items and five open-ended questions. Clarity of instructions scored an average of 4.2/5; interface usability 4.1/5; exploded views 4.5/5; understanding of the importance of correct posture 4.6/5; while 85% of students reported no symptoms of immersion discomfort, 15% reported mild symptoms that quickly regressed. The system's automatic data recording showed average reaction times of 4.2 seconds between the initial alert and the start of movement towards the desk, with correct posture maintained during the intense phase for 87% of the simulation time.

Suggestions that emerged from the open-ended questions concerned the extension to additional scenarios, a greater articulation of gamification dynamics, the introduction of multi-user modes, and some technical improvements related to lighting, audio and haptic feedback. The final de-

briefing, coupled with data visualisation, was perceived by users as the most significant learning moment of the experience, in line with the principles of transformative learning documented by Zehr Gantz et alii (2025). However, this evidence should be interpreted as preliminary, as the pilot study allows verification of system comprehensibility, coherence between the physical and immersive components, and the potential of the protocol, but does not yet support generalisable conclusions on its comparative effectiveness with respect to traditional training methods.

Limitations, barriers to adoption, transferability and scalability | This study has evident limitations that need to be explicitly recognised. The pilot sample is limited in size (n < 40) and geographically circumscribed; therefore, generalisability requires replication studies with larger, more widely distributed samples. On the technical side, the main critical issue concerns optimisation for devices with a low technological threshold: the modelling workflow is optimised for mid-range headsets (Meta Quest 2/3), and the process of transposition to smartphones with low-cost headsets inevitably introduces perceptual degradation that limits the effectiveness of postural feedback, resulting in an access barrier for schools with limited budgets (D'Amore, 2025; Valenti et alii, 2025).

Social and collaborative dynamics remain underdeveloped: group seismic simulation, including dynamics of panic or reliance on a guiding figure (Lin et alii, 2020), requires a more complex technical and narrative architecture, currently not implemented. In terms of institutional sustainability, scaling the system to schools requires addressing barriers that go beyond product design: technology management skills within institutions, maintenance protocols for digital assets, periodic updating of content, and the management of session data privacy for underage students. As documented by Peruccio, Liboni, and Mucchetti (2025) and Giachetta and Buondonno (2024), institutional resistance to the adoption of technological innovations in educational contexts has structural roots that no product, no matter how well designed, can resolve on its own.

In this sense, the results discussed here must be interpreted as exploratory evidence useful to guide the subsequent validation phase, not as definitive confirmation of the effectiveness of the system. Transferability of the model will require testing on larger samples, different age groups, diverse school contexts and less controlled conditions of use. In addition to the inherent limitations of the pilot phase, the adoption of the system in real school contexts encounters barriers that extend beyond the design itself. These include the cost and maintenance of technological equipment, the availability of trained staff, the updating of digital content, the management of session data privacy, and consent procedures in cases involving underage students. These factors are compounded by possible cultural and institutional resistance to immersive devices, perceived as complex or burdensome in relation to established school routines.

The transferability of the LSFS-ILE model depends on validity conditions that must be made explicit. The system appears to be more readily transferable to school contexts with at least a minimal digital infrastructure and suitable spaces for setting up the prototype and immersive sessions. Its transferability also varies according to the type of school, age of users, technological availability, maintenance costs, staff skills and privacy requirements. Finally, the model requires adaptations to different seismic contexts, user profiles and levels of economic and organisational resources. From this perspective, scalability should not be understood as mere technical replication, but as a process of adaptation guided by criteria of accessibility, sustainability, privacy and maintenance. Table 1 summarises the main variables affecting the transferability of the LSFS-ILE model.

Contribution to the Sustainable Development Goals | The project operates at the intersection of four Sustainable Development Goals (SDGs), activating synergies that amplify their impact. For SDG 9, the ILE is conceived as a digital infrastructure rather than a product, with implications for governance, maintenance, and interoperability. The adoption of the ISO/IEC 9234:2025 standard and the integration of physical furniture, digital twin and training protocol define a coherent, replicable and governable innovative system. For SDG 10, the project addresses access to seismic safety as a matter of spatial justice, providing scalability from high-fidelity PC VR solutions to smartphone devices with 360° content, in order to enable graduated access even in resource-limited contexts. For SDG 4, the ILE democratises safety training tools through a

physical-virtual-physical cycle and a modular structure adaptable to different age groups, with a validation protocol geared towards transferability of evidence. Training effectiveness strengthens equity in risk response. For SDG 11, the project contributes to the resilience of school communities in earthquake-prone areas by extending resilience from the structural to the behavioural level. The design of the Life Saving Furniture System as ordinary furniture integrates safety into the learning environment, generating multiplier effects on families and the local area.

In an indirect way, the project also intercepts SDGs 3 and 13, through the reduction of risk and its impacts on public health, as well as SDG 17, due to its collaborative and inter-university nature. The main trade-off concerns the relationship between technological ambition and institutional sustainability: greater sophistication implies greater demands on skills and resources, requiring training policies, public investment and shared standards.

In broader terms, the contribution activates direct effects mainly with respect to SDGs 4, 9 and 11, while the reference to SDG 10 must be motivated in relation to the affordability of the devices, the possibility of adoption in schools located in inland or fragile areas and the reduction of territorial asymmetries in access to advanced safety training tools. With respect to SDGs 1-17 as a whole, the project does not produce uniform impacts, but rather a selective constellation of direct and indirect effects, synergies, and trade-offs. Indirect synergies include public welfare and health, risk reduction and institutional cooperation; trade-offs include technology costs, maintenance requirements, staff training needs and data management issues. In this sense, consistency with the declared SDGs is to be understood not in an abstract form, but as a relationship conditioned by the availability of resources, skills, infrastructure and accompanying policies.

Critical discussion and future directions | The contribution presents the development, architecture, and preliminary validation of an Immersive Learning Environment designed as a digital socio-technical infrastructure to support the Life Saving Furniture System. The research's main interest lies not only in the use of immersive technologies for seismic prevention, but also in the attempt to integrate physical objects, space, simulation, and learning within a single design and experimental device. The data collected in the pilot study suggest that the system shows good comprehensibility in use, a positive usability profile and a pro-

misising ability to guide consistent procedural behaviour during simulation. Such evidence does not yet warrant generalisable conclusions nor a fully demonstrated comparison with traditional training methods: rather than definitively confirming the research hypothesis, the results suggest its plausibility and the need for further verification.

The main novelty of the contribution is not technical but conceptual and methodological: the positioning of ILE as an enabling digital infrastructure of innovation, and not as an additional training layer, allows immersive learning to be read as a constitutive part of complex security systems.

On a theoretical level, this shift redefines the role of learning in the life cycle of security products, relating object, space, behaviour and digital mediation. Methodologically, the research shows the potential of the physical-virtual-physical cycle as a device capable of connecting prototyping, operational feedback, evaluation, and critical reflection, integrating the digital twin, content management, and session data governance (D'Amore, 2025; Valenti et alii, 2025). In terms of application, the work opens up a perspective that can be transferred to other contexts in which design is called upon to support correct behaviour in risky conditions, provided that the organisational, technological and ethical conditions of its implementation are clarified.

Future developments follow several converging lines. A first direction concerns expanding the validation sample, the direct involvement of the target school population, and replication in school contexts diversified by building type, age group, and geographical area. The second relates to the development of the collaborative dimension of the ILE, as collective simulation modes open up pedagogically relevant research scenarios and make it possible to observe more fully the interactive dynamics between users, environment, and device (Davidová, Barath and Dickinson, 2023). The third concerns the integration of more robust metrics, including psychophysiological measures in the evaluation protocol, to more precisely calibrate the intensity of the experience and the quality of procedural responses (Rajabi, Taghaddos and Zahrai, 2022).

From this perspective, the LSFS-ILE system can be considered not as a concluded outcome, but as an open research platform, useful for advancing the debate on the relationship between design, security, learning, and digital infrastructures and for exploring transferable models for transforming behaviour under emergency conditions (Franzo, Quartu and Tufarelli, 2025; Valenti et alii, 2025; D'Amore, 2025).

Acknowledgements

The contribution is part of the research programme 'VITALITY – Innovation, digitalisation and sustainability for the diffused economy in Central Italy – Ecosystems of Innovation Marche-Umbria-Abruzzo', financed with NextGenerationEU funds of the European Union under the PNRR, Mission 4 'Education and Research'. The grant relates to Spoke 6, WP3 'Sustainable design of smart furniture system with life-saving function in conditions of emergency for community settings', Grant ECS00000041 – VITALITY – CUP J13C 22000430001 – Project number ARS01_00914, year 2023-2025. Pilot testing was conducted at the University of

Camerino's School of Architecture and Design, Sant'Angelo Magno, Ascoli Piceno, and at the 'Fermi-Sacconi-Ceci' Higher Education Institute (ITT) in Ascoli Piceno.

The research phase reported here has been completed and was developed by a working group in which F. O. Oppedisano coordinated the scientific setup of the contribution and the immersive environment design; D. Rossi contributed to the definition of the methodological framework, the survey and the construction of the digital twin; M. Scortichini contributed to the design of the experience and to the collection and interpretation of preliminary data.

Data collection activities were carried out in a non-identifying form and with information and consent procedures

consistent with the exploratory nature of the trial. The Authors declare that there are no conflicts of interest.

Note

1) For more information, see: store.steampowered.com/app/607590/Earthquake_Simulator_VR/ [Accessed 26 March 2026].

References

Alexander, D. (1990), "Behavior during earthquakes – A Southern Italian example", in *International Journal of Mass*

- Emergencies and Disasters*, vol. 8, issue 1, pp. 5-29. [Online] Available at: doi.org/10.1177/028072709000800102 [Accessed 26 March 2026].
- Bernardini, G., Quagliarini, E. and D'Orazio, M. (2016), "Towards creating a combined database for earthquake pedestrians' evacuation models", in *Safety Science*, vol. 82, pp. 77-94. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.ssci.2015.09.001 [Accessed 26 March 2026].
- Canessa, N. V. and Centanaro, C. (2024), "Co(mplex)city – Utente come sensore urbano e mobilità accessibile nel progetto Mobiquity | Co(mplex)city – User as urban sensor and accessible mobility in the Mobiquity project", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 88-97. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1672024 [Accessed 26 March 2026].
- Centers for Disease Control and Prevention (2024), *Preparing for an earthquake*. [Online] Available at: cdc.gov/earthquakes/safety/index.html [Accessed 26 March 2026].
- Chittaro, L. and Buttussi, F. (2015), "Assessing knowledge retention of an immersive serious game vs. a traditional education method in aviation safety", in *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 21, issue 4, pp. 529-538. [Online] Available at: doi.org/10.1109/TVCG.2015.2391853 [Accessed 26 March 2026].
- Chittaro, L. and Sioni, R. (2015), "Serious games for emergency preparedness – Evaluation of an interactive vs. a non-interactive simulation of a terror attack", in *Computers in Human Behavior*, vol. 50, pp. 508-519. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.chb.2015.03.074 [Accessed 26 March 2026].
- D'Amore, A. E. (2025), "Gemello digitale e processo edilizio – Riflessioni su produttività, energia e salute | The digital twin and the building process – Reflections on productivity, energy, and health", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 18, pp. 144-161. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/1872025 [Accessed 26 March 2026].
- Davidová, M., Barath, S. and Dickinson, S. (2023), "Ambienti culturali con prospettive non solo umane – Prototipazione attraverso ricerca e formazione | Cultural environments with more-than-human perspectives – Prototyping through research and training", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 13, pp. 165-178. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/13142023 [Accessed 26 March 2026].
- Feng, Z., González, V. A., Amor, R., Lovreglio, R. and Cabrera-Guerrero, G. (2018), "Immersive virtual reality serious games for evacuation training and research – A systematic literature review", in *Computers & Education*, vol. 127, pp. 252-266. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.compedu.2018.09.002 [Accessed 26 March 2026].
- Feng, Z., González, V. A., Amor, R., Spearpoint, M., Thomas, J., Sacks, R., Lovreglio, R. and Cabrera-Guerrero, G. (2020), "An immersive virtual reality serious game to enhance earthquake behavioral responses and post-earthquake evacuation preparedness in buildings", in *Advanced Engineering Informatics*, vol. 45, article 101118, pp. 1-15. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.aei.2020.101118 [Accessed 26 March 2026].
- Franzo, P., Quartu, A. and Tufarelli, M. (2025), "Re-shaping fashion in Italy – Sistemi circolari, scenari phygital e formazione informale | Re-shaping fashion in Italy – Circular systems, phygital scenarios, and informal education", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 18, pp. 344-357. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/18212025 [Accessed 26 March 2026].
- Giachetta, A. and Buondonno, L. (2024), "La formazione dell'Architetto in realtà complesse – Un nuovo approccio sul piano cognitivo | Architect training in multifaceted environments – A new cognitive level approach", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 50-59. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1642024 [Accessed 26 March 2026].
- Hettinger, L. J. and Riccio, G. E. (1992), "Visually induced motion sickness in virtual environments", in *Presence | Teleoperators & Virtual Environments*, vol. 1, issue 3, pp. 306-310. [Online] Available at: doi.org/10.1162/pres.1992.1.3.306 [Accessed 26 March 2026].
- Hung, M.-C., Lin, C.-Y. and Hsiao, G. L.-K. (2025), "Virtual Reality in Building Evacuation – A Review", in *Fire*, vol. 8, issue 2, article 80, pp. 1-23. [Online] Available at: doi.org/10.3390/fire8020080 [Accessed 26 March 2026].
- ISO/IEC (2025), *ISO/IEC 9234:2025 – Information technology – Information modelling for virtual, augmented and mixed reality based education and training systems*. [Online] Available at: iso.org/standard/83436.html [Accessed 26 March 2026].
- Kaggwa, M. M., Chaimowitz, G. A., Agboinghale, P., Marginean, D. and Olagunju, A. T. (2025), "Virtual reality training programs in disaster preparedness – A systematic review", in *Discover Education*, vol. 4, article 325, pp. 1-15 [Online] Available at: doi.org/10.1007/s44217-025-00771-5 [Accessed 26 March 2026].
- Keshavarz, B. (2016), "Exploring behavioral methods to reduce visually induced motion sickness in virtual environments", in Lackey, S. and Shumaker, R. (eds), *Virtual, Augmented and Mixed Reality – Proceedings of the 8th International Conference – VAMR 2016, Toronto, Canada, July 17-22, 2016*, Lecture Notes in Computer Science, vol. 9740, Springer, Cham, pp. 147-155. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-3-319-39907-2_14 [Accessed 26 March 2026].
- LaValle, S. M. (2023), *Virtual Reality*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Li, C., Liang, W., Quigley, C., Zhao, Y. and Yu, L.-F. (2017), "Earthquake safety training through virtual drills", in *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 23, issue 4, pp. 1275-1284. [Online] Available at: doi.org/10.1109/TVCG.2017.2656958 [Accessed 26 March 2026].
- Lin, J., Zhu, R., Li, N. and Becerik-Gerber, B. (2020), "Do people follow the crowd in building emergency evacuation? – A cross-cultural immersive virtual reality-based study", in *Advanced Engineering Informatics*, vol. 43, article 101040, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.aei.2020.101040 [Accessed 26 March 2026].
- Liu, Q. and Liu, R. (2024), "Virtual reality for indoor emergency evacuation studies – Design, development, and implementation review", in *Safety Science*, vol. 180, article 106678. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.ssci.2024.106678 [Accessed 26 March 2026].
- Lovreglio, R., González, V. A., Feng, Z., Amor, R., Spearpoint, M., Thomas, J., Trotter, M. and Sacks, R. (2018), "Prototyping virtual reality serious games for building earthquake preparedness – The Auckland City Hospital case study", in *Advanced Engineering Informatics*, vol. 38, pp. 670-682. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.aei.2018.08.018 [Accessed 26 March 2026].
- Mezirow, J. (1997), "Transformative learning – Theory to practice", in *New Directions for Adult and Continuing Education*, vol. 1997, issue 74, pp. 5-12. [Online] Available at: doi.org/10.1002/ace.7401 [Accessed 26 March 2026].
- Nava, C. and Melis, A. (2024), "IA generativa e complessità – Verso un nuovo paradigma nel design digitale rigenerativo | Generative IA and complexity – Towards a new paradigm in regenerative digital design", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 40-49. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1632024 [Accessed 26 March 2026].
- Peruccio, P. P., Liboni, M. and Mucchetti, F. (2025), "Il ruolo degli archivi d'impresa nell'era della blockchain e della IA | The role of corporate archives in the era of blockchain and AI", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 348-359. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/17242025 [Accessed 26 March 2026].
- Pietroni, L., Fabbri, I., Galloppo, D. and Balsamo, M. F. (2025), "Vitality Pilot Project – Una sperimentazione interdisciplinare per accrescere la sicurezza nelle scuole dei territori ad alto rischio sismico", in Morone, A. (ed.), *Design Plurale – Casi e modelli alternativi per l'innovazione – Atti Conferenza Nazionale di Design | Plural Design – Cases and alternative models for innovation – Proceedings Italian Design Society Conference, Naples, Italy, June 26-27, 2025*, Federico II University Press, Napoli, pp. 218-233. [Online] Available at: pubblicazioni.unicam.it/retrieve/69cd7 ad-6f11-479d-9a0a-f98c48b49a62/ATTI-SID-NAPOLI-2025_estratto-1.pdf [Accessed 26 March 2026].
- Pietroni, L., Mascitti, J. and Galloppo, D. (2021), "Arredi salva-vita in caso di sisma – Intelligenti, interconnessi e interagenti | Life-saving furniture during an earthquake – Intelligent, interconnected and interacting", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 10, pp. 218-229. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/10202021 [Accessed 26 March 2026].
- Rajabi, M. S., Taghaddos, H. and Zahrai, S. M. (2022), "Improving Emergency Training for Earthquakes Through Immersive Virtual Environments and Anxiety Tests – A Case Study", in *Buildings*, vol. 12, issue 11, article 1850, pp. 1-22. [Online] Available at: arxiv.org/abs/2205.04993 [Accessed 26 March 2026].
- Scorgie, D., Feng, Z., Paes, D., Parisi, F., Yiu, T. W. and Lovreglio, R. (2024), "Virtual reality for safety training – A systematic literature review and meta-analysis", in *Safety Science*, vol. 171, article 106372, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.ssci.2023.106372 [Accessed 26 March 2026].
- Sitzmann, T. (2011), "A meta-analytic examination of the instructional effectiveness of computer-based simulation games", in *Personnel Psychology*, vol. 64, issue 2, pp. 489-528. [Online] Available at: doi.org/10.1111/j.1744-6570.2011.01190.x [Accessed 26 March 2026].
- Stefan, H., Mortimer, M. and Horan, B. (2023), "Evaluating the effectiveness of virtual reality for safety-relevant training – A systematic review", in *Virtual Reality*, vol. 27, issue 4, pp. 2839-2869. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s10055-023-00843-7 [Accessed 26 March 2026].
- Vacanti, A., De Chirico, M., Crippa, D. and Fagnoni, R. (2025), "Temporalità digitale – La responsabilità dell'Interaction Design nell'alienazione digitale | Digital temporality – The responsibility of Interaction Design in digital alienation", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 336-347. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/17232025 [Accessed 26 March 2026].
- Valenti, A., Scalisi, F., Sposito, C., Colaci, D. F. and Moor, G. (2025), "Design, tecnologia e povertà – Dispositivi per il progetto di architetture, oggetti e società | Design, technology, and poverty – Devices for the design of architecture, objects, and society", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 42-67. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/1722025 [Accessed 26 March 2026].
- Wang, J., Samarasinghe, D. A., Aquino, D. H. M. and Ying, F. (2026), "A Systematic Review of Digital Technologies for Emergency Preparedness in Buildings", in *Buildings*, vol. 16, issue 4, article 856, pp. 1-29. [Online] Available at: doi.org/10.3390/buildings16040856 [Accessed 26 March 2026].
- Wouters, P., van Nimwegen, C., van Oostendorp, H. and van der Spek, E. D. (2013), "A meta-analysis of the cognitive and motivational effects of serious games", in *Journal of Educational Psychology*, vol. 105, issue 2, pp. 249-265. [Online] Available at: doi.org/10.1037/a0031311 [Accessed 26 March 2026].
- Xu, Z., Zhang, H., Wei, W. and Yang, Z. (2019), "Virtual Scene Construction for Seismic Damage of Building Ceilings and Furniture", in *Applied Sciences*, vol. 9, issue 17, article 3465, pp. 1-21. [Online] Available at: doi.org/10.3390/app9173465 [Accessed 26 March 2026].
- Zehr Gantz, S., Massari, S., McDonagh, D. and Vokoun, J. (2025), "Affrontare l'insicurezza alimentare – Empatia e Design Thinking per l'apprendimento trasformativo | Addressing food insecurity – Leveraging empathy and Design Thinking to achieve transformative learning", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 384-397. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/17272025 [Accessed 26 March 2026].