

RESILIENZA ORGANIZZATIVA E FORMAZIONE IN REALTÀ VIRTUALE PER LA SALUTE E LA SICUREZZA SUL LAVORO: I RISULTATI DEL PROGETTO FEREÒ

INAIL

2026



TRAINING

COLLANA RICERCHE

RESILIENZA ORGANIZZATIVA E FORMAZIONE IN REALTÀ VIRTUALE PER LA SALUTE E LA SICUREZZA SUL LAVORO: I RISULTATI DEL PROGETTO FEREO

INAIL

2026

Pubblicazione realizzata da

Inail

Dipartimento di medicina, epidemiologia, igiene del lavoro e ambientale

Coordinamento scientifico

Sara Stabile¹, Francesco Costantino², Marco Carli³

Autori

Rosina Bentivenga¹, Margherita Bernabei⁴, Marco Carli³, Silvia Colabianchi⁵, Francesco Costantino², Anna Ferrarotti³, Emma Pietrafesa¹, Edvige Sorrentino¹, Sara Stabile¹

Redazione editoriale e grafica

Pina Galzerano¹, Laura Medei¹

¹ Inail - Dipartimento di medicina, epidemiologia, igiene del lavoro e ambientale

² Sapienza Università di Roma – Dipartimento di ingegneria informatica, automatica e gestionale “Antonio Ruberti”

³ Università degli Studi Roma Tre – Dipartimento di ingegneria industriale, elettronica e meccanica

⁴ Sapienza Università di Roma – Dipartimento di ingegneria meccanica e aerospaziale

⁵ Universitas Mercatorum – Dipartimento di ingegneria e scienze

Per informazioni

Inail – Dipartimento di medicina, epidemiologia, igiene del lavoro e ambientale

Via Fontana Candida,1 - 00078 Monte Porzio Catone (RM)

www.inail.it

© 2026 Inail

ISBN 978-88-7484-979-6

Gli autori hanno la piena responsabilità delle opinioni espresse nella pubblicazione, che non vanno intese come posizioni ufficiali dell’Inail.

Le pubblicazioni vengono distribuite gratuitamente e ne è quindi vietata la vendita nonché la riproduzione con qualsiasi mezzo. È consentita solo la citazione con l’indicazione della fonte.

Tipolitografia Inail - Milano, febbraio 2026

PREMESSA

L'attuale contesto industriale è influenzato dall'ampia adozione delle tecnologie digitali che stanno trasformando le modalità di lavoro tradizionali, modificando processi, strumenti e responsabilità e introducendo complessità sempre più crescenti nelle interazioni uomo-macchina.

La trasformazione digitale sta profondamente influenzando il modo in cui viviamo e lavoriamo, portando con sé nuove sfide e opportunità per la salute e la sicurezza nei contesti lavorativi. In questo scenario di rapida evoluzione, diventa essenziale interrogarsi su come le nuove tecnologie possano essere integrate nei processi organizzativi, mantenendo al centro la persona e il benessere dei lavoratori. La capacità di adattamento delle organizzazioni, la cosiddetta resilienza, assume un ruolo chiave per affrontare le complessità del cambiamento e garantire ambienti di lavoro sicuri e sostenibili.

La monografia che segue nasce dalla volontà di esplorare questi temi, offrendo una riflessione sulle potenzialità che la realtà virtuale e le tecnologie immersive possono avere nel campo della formazione per la sicurezza sul lavoro. L'obiettivo è invitare il lettore a considerare la digitalizzazione non solo come una sfida tecnica, ma come un processo che coinvolge aspetti culturali, sociali ed etici, favorendo un approccio integrato e partecipativo nei percorsi di crescita e prevenzione all'interno delle organizzazioni. Solo attraverso un dialogo aperto tra innovazione tecnologica e attenzione alle persone sarà possibile costruire un futuro del lavoro più sicuro, resiliente e inclusivo.

Per affrontare tale trasformazione e i nuovi rischi per la salute e sicurezza che essa comporta è necessario fare riferimento a nuovi paradigmi e metodi di safety assessment che tengano conto dei cambiamenti degli ambienti di lavoro e delle interazioni uomo-macchina, come ad esempio quelli che riguardano le logiche della Resilience Engineering e della Safety 2. È inoltre importante sviluppare nuove modalità di informazione e formazione per i lavoratori sfruttando le potenzialità delle tecnologie immersive.

L'inail, nel piano di attività di ricerca triennale 2022-2024, ha previsto un programma di ricerca sperimentale incentrato sull'innovazione dei processi connessi alla digitalizzazione, alla robotizzazione, alle nanotecnologie e alle biotecnologie: dalla gestione dei rischi alle opportunità per gli interventi di prevenzione nel quale è stato sviluppato un obiettivo dedicato alla trasformazione digitale, all'organizzazione del lavoro e alla tutela della salute e sicurezza dei lavoratori. In tale contesto, attraverso il bando di ricerca in collaborazione (BRiC) 2022-2024, è stato realizzato un progetto di ricerca che ha previsto la ricognizione e l'analisi di processi e modalità di organizzazione del lavoro interessati dalla trasformazione digitale, la sperimentazione di un modello di rilevazione della resilienza e la progettazione e lo sviluppo di strumenti formativi innovativi sulla salute e sicurezza sul lavoro. I progetti BRiC

sono costruiti in una logica di rete al fine di garantire interdisciplinarietà, qualità della produzione scientifica e capacità di risposta ai bisogni di tutela nel rapido cambiamento del mondo del lavoro contemporaneo.

Nella monografia vengono presentati i risultati del progetto Fereo -Formazione e Resilience Engineering Organizzativa con le nuove tecnologie abilitanti finanziato da Inail (BRiC 2022 ID 63) e realizzato dal Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale dell'Università degli Studi di Roma La Sapienza e dal Dipartimento di Ingegneria Industriale, Elettronica e Meccanica dell'Università degli Studi Roma Tre, in collaborazione con il Dipartimento di medicina epidemiologia, igiene del lavoro e ambientale dell'Inail.

In particolare, viene approfondito lo sviluppo di un tool di autovalutazione dello stato potenziale di resilienza organizzativa per le aziende che adottano tecnologie 4.0 sulla base delle evidenze emerse in relazione ai cambiamenti dei processi e dei modelli organizzativi nelle aziende del settore manifatturiero. Inoltre, vengono presentate le indicazioni metodologiche per la progettazione, lo sviluppo, l'erogazione e la valutazione di un virtual journey per la salute e sicurezza sul lavoro dedicato alle procedure di sicurezza Lockout-Tagout (LOTO) per la manutenzione di macchine e impianti e illustrati i risultati di un protocollo sperimentale per la valutazione dell'efficacia del prototipo formativo realizzato in realtà virtuale rispetto alla formazione tradizionale.

L'utilizzo di tali indicazioni permetterà di contribuire a migliorare il rapporto uomo-macchina nelle organizzazioni, di sperimentare modalità innovative di formazione replicabili in diversi ambienti lavorativi, di rendere flessibile la gestione dei cambiamenti e la capacità di risposta a diversi scenari di rischio e di favorire un apprendimento partecipativo, dinamico e personalizzato.

Bruno Papaleo

*Direttore del Dipartimento di medicina epidemiologia,
igiene del lavoro e ambientale*

INDICE

1. IL PROGETTO FEREØ	7
1.1 LA RESILIENCE ENGINEERING	8
1.2 I MODELLI ORGANIZZATIVI	11
1.3 GLI STRUMENTI FORMATIVI	13
2. L'INDAGINE NAZIONALE	16
2.1 LA PROGETTAZIONE DELL'INDAGINE NAZIONALE	16
2.2 I RISULTATI DELL'INDAGINE NAZIONALE	22
2.3 IL TOOL PER L'AUTOVALUTAZIONE	29
3. GLI STRUMENTI INNOVATIVI PER L'INFORMAZIONE E LA FORMAZIONE ALLA SSL	33
3.1 L'INNOVAZIONE NEI CONTENUTI: DALL'ACQUISIZIONE DELLA CONOSCENZA ALLA GESTIONE DELL'IMPREVISTO	35
3.2 L'INNOVAZIONE NEGLI STRUMENTI: LA REALTÀ VIRTUALE COME STRUMENTO IMMERSIVO PER LA SSL	38
4. CONCLUSIONI	54
5. PRINCIPALI OUTPUT DEL PROGETTO	56
BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA	59
ACRONIMI	62

1. IL PROGETTO FEREEO

Il progetto Fereo (Formazione e Resilience Engineering Organizzativa con le nuove tecnologie abilitanti) si sviluppa in un periodo di profonda e rapida trasformazione dei sistemi organizzativi e produttivi. La diffusione di tecnologie smart e la più ampia transizione digitale hanno rivoluzionato sia gli ambienti di lavoro sia le modalità di interazione tra lavoratori e sistemi tecnologici, rendendo necessario un ripensamento sostanziale delle strategie di gestione della salute e sicurezza sul lavoro (SSL) [1].

Tradizionalmente, la prevenzione si è fondata sul paradigma Safety-I, un approccio reattivo e retrospettivo che mira a eliminare gli incidenti attraverso l'analisi dei fallimenti. In questa prospettiva, la sicurezza è definita dall'assenza di eventi negativi, e l'attenzione si concentra sull'individuazione e correzione delle cause immediate dell'errore [2].

Nel progetto Fereo vengono, invece, adottati principi del paradigma Safety-II, che propone una visione proattiva della sicurezza [2]. Il focus si sposta dalla domanda "perché le cose sono andate male?" a "perché le cose vanno (quasi sempre) bene?". La sicurezza non è più solo assenza di incidenti, ma diventa la capacità del sistema di adattarsi, mantenere e anche migliorare le prestazioni in condizioni di variabilità e di fronte a sfide inattese. L'obiettivo si amplia, quindi, dalla semplice prevenzione del fallimento alla comprensione dei successi quotidiani e al sostegno degli adattamenti che consentono al lavoro di essere svolto efficacemente nonostante pressioni, vincoli e disturbi.

L'applicazione operativa di questo paradigma si basa sulla Resilience Engineering (RE) [3], un approccio che descrive la capacità dei sistemi socio-tecnici di assorbire variazioni, reagire a perturbazioni e adattare il proprio funzionamento garantendo continuità e qualità delle prestazioni.

In coerenza con questa visione, il progetto Fereo si è sviluppato lungo due direttrici principali.

La prima riguarda l'analisi dei processi e dei modelli organizzativi coinvolti nella trasformazione digitale, con l'obiettivo di individuare gli aspetti di RE da potenziare e di sviluppare strumenti operativi che consentano alle aziende di monitorare e diagnosticare tali aspetti in autonomia.

La seconda riguarda l'impiego delle tecnologie digitali – in particolare della Realtà Virtuale (VR) – per progettare percorsi formativi di nuova generazione. L'obiettivo è innovare la formazione sia nei contenuti ("di cosa si parla quando si fa formazione?") sia negli strumenti ("con quali tecnologie si eroga la formazione?"), sviluppando soluzioni in grado di stimolare l'esplorazione di scenari complessi e inattesi, fondamentali per allenare le capacità adattive degli operatori, in linea con i principi di Safety-II e RE.

I risultati del progetto offrono un contributo significativo sia alla ricerca sia al mondo industriale. Una vasta indagine nazionale che ha coinvolto oltre 300 aziende del settore manifatturiero italiano ha permesso di rilevare il divario tra le pratiche di RE considerate importanti e quelle effettivamente adottate; i dati raccolti hanno, inoltre, consentito di realizzare un tool diagnostico che le organizzazioni possono utilizzare per valutare il proprio livello di resilienza. In parallelo, è stato sviluppato un prototipo formativo in VR che, simulando procedure operative in un ambiente controllato, funge da vero e proprio laboratorio per la sperimentazione di strategie decisionali adattive.

L'impatto scientifico del progetto Fereo si è tradotto in un'intensa attività di disseminazione: i risultati teorici e applicativi sono stati presentati in congressi nazionali e internazionali, pubblicati su riviste scientifiche internazionali e discussi in seminari e fiere di settore.

Le principali evidenze sono riportate in elenco cronologico dal più recente al meno recente al termine di questo volume e testimoniano la rilevanza nazionale ed internazionale del progetto e la sua capacità di generare conoscenza scientifica immediatamente applicabile nei contesti di prevenzione avanzata.

1.1 LA RESILIENCE ENGINEERING

Nel panorama degli studi dedicati ai sistemi complessi, l'ingegneria della resilienza si è affermata come una lente capace di rivelare la natura profonda dei sistemi sociotecnici, ossia quei contesti in cui persone, tecnologie, procedure e decisioni interagiscono costantemente, influenzandosi con dinamiche non lineari. È sufficiente che un singolo elemento muti, anche solo in modo impercettibile, perché l'intero equilibrio si trasformi: la sicurezza, in questo quadro, non appare più come uno stato fisso da preservare, ma come una proprietà emergente, continuamente ridefinita dall'azione quotidiana [4].

Questa prospettiva accompagna il passaggio dal paradigma Safety-I al paradigma Safety-II. Mentre il primo concentra l'attenzione sui fallimenti e sulle deviazioni da standard prestabiliti, il secondo si focalizza sulla capacità dei sistemi di funzionare con successo nonostante pressioni, disturbi e imprevisti. La sicurezza diventa così un'attività dinamica e adattiva, un risultato che si rinnova e si ricostruisce continuamente attraverso il lavoro reale [5].

Numerose definizioni hanno contribuito a delineare il concetto di resilienza. Una visione generale la descrive come la capacità intrinseca di un sistema di mantenere o ristabilire uno stato dinamico stabile (*steady state*) e garantire l'operatività nonostante interruzioni, disturbi o pressioni ricorrenti. David Woods, uno dei pionieri della disciplina, sottolinea come le organizzazioni resilienti siano quelle in grado di adattarsi gradualmente ed efficacemente alle sorprese, distinguendo la resilienza dalla semplice robustezza, che si limita a resistere a minacce note [6].

La formulazione proposta da Erik Hollnagel rappresenta una delle interpretazioni più influenti: la resilienza è la capacità di un sistema sociotecnico di mantenere le prestazioni desiderate – o di recuperarle rapidamente – anche in condizioni impreviste, grazie alla regolazione continua e flessibile del proprio funzionamento. Hollnagel traduce questa idea in quattro abilità cardine [7]:

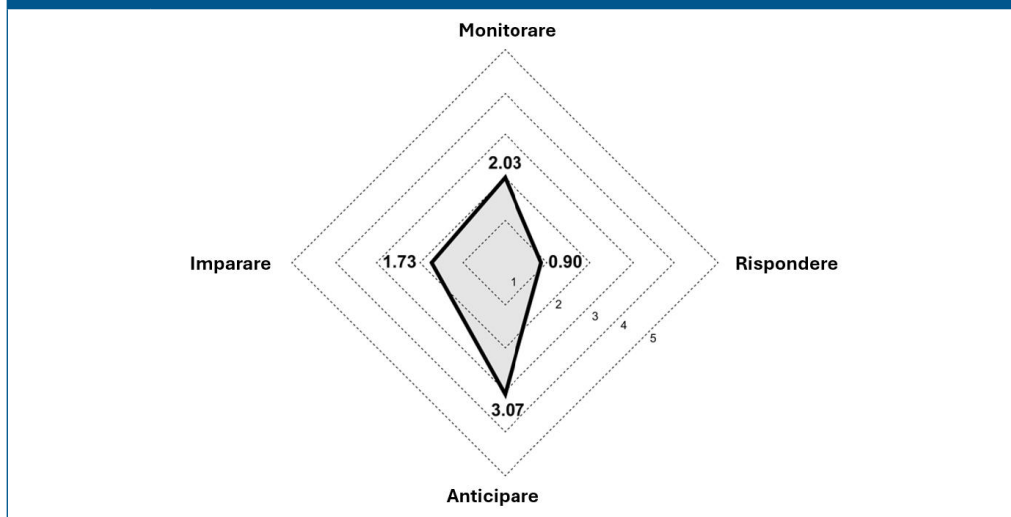
- **monitorare**: valutare continuamente ciò che accade e comprendere cosa sia importante osservare. Questo implica identificare segnali deboli, rilevare deviazioni minori e tenere sotto controllo le condizioni che potrebbero erodere i margini di sicurezza. È la capacità di cogliere la situazione *hic et nunc*;
- **rispondere**: agire in modo tempestivo ed efficace di fronte a disturbi o imprevisti, attingendo alle risposte apprese ma con la flessibilità necessaria per adattarle al contesto specifico. Un sistema resiliente deve disporre di un repertorio ampio e aggiornabile di risposte operative;
- **anticipare**: prevedere rischi emergenti e potenziali opportunità prima che si manifestino pienamente. Comprende la valutazione dinamica del rischio, l'analisi di scenari futuri e la preparazione del sistema ad affrontare eventi non ancora accaduti;
- **imparare**: evolvere sulla base dell'esperienza, non solo analizzando gli incidenti, ma soprattutto codificando gli adattamenti di successo che caratterizzano il lavoro quotidiano. Apprendere significa modificare nel tempo ciò che si monitora, il modo in cui si risponde e la capacità di anticipare.

Queste quattro abilità formano un insieme indivisibile: ciascuna sostiene e alimenta le altre. Senza la capacità di rispondere, ogni sistema sarebbe destinato al fallimento, ma risposte rigide e immutabili non potrebbero garantire successo nel lungo periodo senza un continuo apprendimento. A sua volta, la risposta dipende dal monitoraggio: senza segnali tempestivi, ogni evento sorprenderebbe il sistema impreparato. Il monitoraggio e la risposta, però, devono evolvere nel tempo grazie proprio all'apprendimento, che permette di consolidare ciò che funziona e di correggere ciò che non funziona. In ambienti dinamici e incerti, infine, l'anticipazione diventa essenziale: non si può vivere solo di reazioni, occorre saper immaginare ciò che ancora non è accaduto, aggiornando continuamente la propria comprensione del presente.

Tipicamente, quindi, queste quattro capacità vengono analizzate congiuntamente e illustrate mediante rappresentazioni grafiche analoghe al *radar-chart* riportato in Figura 1.

Figura 1

Le quattro abilità cardine per la resilienza secondo Erik Hollnagel



(Hollnagel E. *Safety-II in practice: Developing the resilience potentials*. Routledge; 2017. *Elaborazione Inail - Dipartimento di medicina, epidemiologia, igiene del lavoro e ambientale*)

Questa visione induce a considerare con nuova attenzione il divario costante tra Work As Imagined (WAI) e Work As Done (WAD) [8].

In una visione semplicistica che non considera tutte le varietà di lavoro Work As X (WAX), il WAI rappresenta il lavoro così come è immaginato, pianificato, formalizzato nelle procedure, nei manuali e nei diagrammi di processo: un modello ideale, stabile, ordinato. Il WAD, al contrario, è il lavoro reale, quello che prende forma nel quotidiano attraverso aggiustamenti, compromessi, scorciatoie, decisioni improvvisate ma non casuali, frutto dell'esperienza e delle condizioni concrete. È nel WAD che si esercitano realmente le abilità resilienti, ed è nei suoi adattamenti che spesso si annida il segreto del successo operativo.

Se i fallimenti non derivano semplicemente dalla deviazione rispetto al WAI, ma dal fallimento degli adattamenti messi in atto nel WAD, diventa allora evidente che comprendere il lavoro reale è indispensabile. Solo osservando ciò che le persone effettivamente fanno – e non solo ciò che dovrebbero fare – è possibile rafforzare le strategie adattive che garantiscono sicurezza ed efficacia.

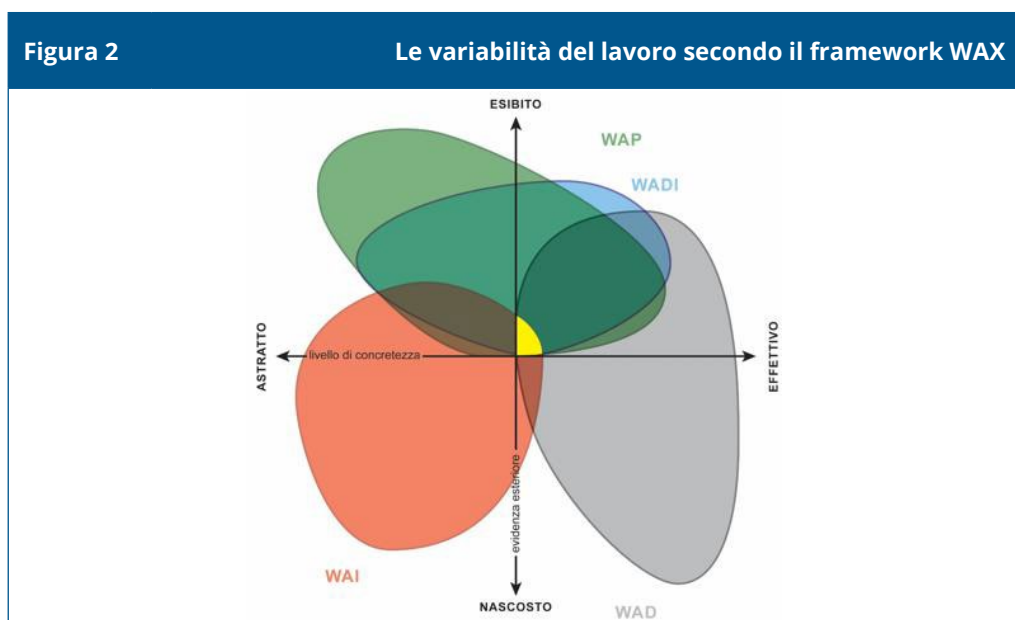
La RE propone, dunque, di osservare i sistemi sociotecnici con una sensibilità nuova: non come macchine da correggere, ma come organismi viventi che imparano, si adattano e reagiscono.

Attraverso questa prospettiva diventa possibile riconoscere la variabilità non come un'anomalia da eliminare, ma come una risorsa da valorizzare. Ed è proprio sviluppando questa consapevolezza che le organizzazioni possono prepararsi ad affrontare un mondo industriale in costante cambiamento, mantenendo viva la capacità di riuscire, nonostante tutto.

1.2 I MODELLI ORGANIZZATIVI

Adottare il modello concettuale proposto da Hollnagel significa acquisire una prospettiva radicalmente diversa sul funzionamento delle organizzazioni. Non si tratta più solamente di verificare se le procedure siano seguite pedissequamente, ma di comprendere anche come i sistemi sociotecnici riescano a convivere con la variabilità che li attraversa. Questa variabilità non è un fastidio da eliminare: è una componente strutturale e inevitabile di ogni attività umana complessa [9]. Nelle realtà produttive contemporanee, segnate da una crescente complessità tecnologica e organizzativa, non basta redigere protocolli dettagliati per assicurare stabilità e sicurezza. L'affidabilità quotidiana emerge invece dalla capacità dei sistemi di adattarsi, di compensare pressioni e risorse limitate, e di reagire con prontezza alle condizioni inaspettate che si presentano sul campo [10].

Per interpretare questa dinamica, un ruolo centrale è svolto dal framework del WAX [8] – riportato in Figura 2.



(Falegnami A. Design sociotecnico di indicatori proattivi tramite la Resilience Engineering)

Esso offre una mappa concettuale attraverso cui esplorare la distanza – talvolta lieve, talvolta abissale – tra le diverse rappresentazioni del lavoro. Il Work As Imagined (WAI) esprime il lavoro in termini potenziali e mentali: include il modo in cui il lavoro è concepito in astratto, come si ritiene venga svolto da altri, o come ciascun operatore immagina di svolgerlo personalmente. È un mondo ordinato, statico, spesso lineare. Il Work As Prescribed (WAP) rappresenta invece il lavoro formalizzato sotto forma di regole, procedure, *checklist*, standard, linee guida, leggi e regolamenti. Pur essendo facilmente accessibile e verificabile, il WAP resta perlopiù distante dalla realtà operativa, sebbene venga comunemente considerato corretto e sicuro. Proprio per questa sua natura, esso viene frequentemente utilizzato come riferimento legale, come base per le analisi di rischio e per i controlli di safety, o persino in modo strumentale, ad esempio attraverso un'adesione rigidamente letterale alle prescrizioni. Tuttavia, il lavoro non è mai completamente prescrivibile: una stessa attività può essere svolta in molteplici modi, e nella pratica quotidiana gli operatori alternano, combinano e riorganizzano continuamente le attività, dando luogo a forme di meta-lavoro che sfuggono alla formalizzazione.

Tra prescrizione e azione si colloca il Work As Disclosed (WADI), ovvero il lavoro così come viene divulgato attraverso atti comunicativi quali osservazioni *in situ*, interviste, audit, interrogazioni o ricostruzioni a posteriori. Il WADI non coincide necessariamente con il lavoro effettivamente svolto, ma ne costituisce una rappresentazione mediata, che deve essere interpretata in termini comunicativi e semiotici, tenendo conto del contesto, delle finalità della divulgazione e del destinatario del messaggio.

Il Work As Done (WAD) rappresenta infine il lavoro realmente svolto: l'insieme delle attività concrete, situate e contingenti attraverso cui il sistema opera nel presente. È il livello che si vorrebbe conoscere direttamente, ma al quale si può accedere solo indirettamente quando si osserva il lavoro altrui, oppure attraverso il proprio WAI quando si riflette sul proprio operato, oltre che mediante gli artefatti tangibili prodotti dal lavoro stesso. Il WAD è un mondo vivo, dinamico, fatto di aggiustamenti locali, soluzioni improvvisate, ottimizzazioni informali e decisioni prese sulla base di informazioni incomplete ma contestualmente rilevanti. È in questo spazio che gli operatori reinterpretano continuamente il lavoro, consentendo al sistema di funzionare nonostante vincoli, carenze e pressioni.

In questa prospettiva, il divario tra WAI (semplicisticamente inteso come l'insieme di WAP, WADI e WAI) e WAD, non è il segno di un fallimento da correggere, ma la sorgente stessa della resilienza. È grazie agli adattamenti incorporati nel WAD che le organizzazioni riescono a far fronte alla complessità, mantenendo le proprie prestazioni anche quando le condizioni deviano dalle aspettative. Un modello organizzativo coerente con i principi della RE non cerca dunque di abolire questo scostamento, ma di comprenderlo, sostenerlo e incanalarlo. Lascia spazio agli operatori perché possano esercitare il proprio margine di manovra, riconoscendo che in quel margine si gioca buona parte della capacità di affrontare l'imprevisto. Guardare ai modelli organizzativi attraverso questa lente significa anche riflettere

sul significato più profondo di Safety-II nella gestione della sicurezza. Il tradizionale paradigma della colpa – che vede l'errore umano come origine dei problemi – lascia il posto a una visione che valorizza il ruolo degli operatori come agenti di stabilità, non di fragilità. L'organizzazione che abbraccia la prospettiva Safety-II investe nel supporto, non nel controllo; riconosce la competenza adattiva delle persone e si impegna a rafforzarla, piuttosto che soffocarla.

In questa cornice, un interrogativo guida assume un rilievo cruciale: quanto le aziende sono realmente capaci di integrare nelle loro pratiche quotidiane le quattro abilità fondamentali della resilienza – monitorare, rispondere, anticipare e imparare? La risposta non si trova nelle procedure scritte, ma nel modo in cui le organizzazioni vivono e interpretano il lavoro reale. È in questa integrazione quotidiana, spesso silenziosa ma fondamentale, che si misura la maturità resiliente di un sistema e la sua capacità di evolvere verso modelli operativi davvero adattivi, coerenti con le sfide del mondo produttivo contemporaneo.

1.3 GLI STRUMENTI FORMATIVI

I principi di resilienza, quando applicati al mondo della formazione, non rappresentano semplici veicoli di nozioni procedurali, ma leve capaci di accrescere la flessibilità cognitiva e operativa delle persone.

In questa prospettiva, lo scopo degli strumenti formativi non è trasmettere un repertorio fisso di regole, bensì offrire spazi sicuri e strutturati in cui esplorare la variabilità, esercitare la capacità di fronteggiare l'imprevisto e sperimentare decisioni in condizioni complesse.

Per dare forma a questa visione è possibile ancorare l'intero processo formativo a un modello cognitivo, capace di descrivere i diversi livelli di apprendimento attraverso cui le persone interagiscono con il proprio ambiente operativo. Il riferimento privilegiato è il modello Skill-Rule-Knowledge (SRK) elaborato da Jens Rasmussen [11]. Il modello SRK offre la seguente classificazione delle risposte umane (Figura 3), guidando così la calibrazione dei contenuti formativi.

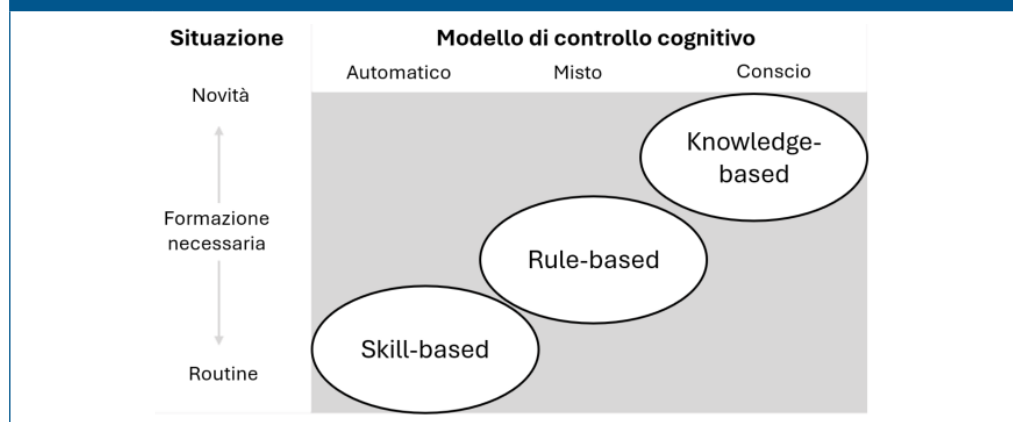
- **Skill-based behavior:** riguarda le azioni altamente automatizzate ed eseguite inconsciamente (ad esempio, muovere un arto, camminare, eseguire una sequenza di movimenti familiari). A questo livello, l'azione è istintiva e tipicamente guidata da pattern senso-motori.
- **Rule-based behavior:** riguarda le azioni guidate da regole o procedure predefinite (ad esempio, *se accade X, fai Y*). Queste risposte sono appropriate per situazioni familiari in cui è possibile applicare una procedura standard e nota senza ricorrere necessariamente ad un'analisi approfondita.
- **Knowledge-based behavior:** riguarda le azioni guidate da un ragionamento analitico e/o dalla comprensione profonda dei principi del sistema. Si attiva in situazioni nuove o inattese per le quali non esistono procedure note. È il livello cruciale per la gestione dell'imprevisto e per la manifestazione della resilienza.

Una formazione coerente con la prospettiva della RE non può dunque limitarsi a sviluppare competenze di tipo skill o rule, ma deve spingersi oltre, coltivando il livello knowledge. L'obiettivo è dare agli operatori la capacità di andare oltre la mera applicazione meccanica delle regole quando le regole non bastano, e di costruire risposte efficaci anche davanti a scenari nuovi e non codificati.

Per rendere possibile questo tipo di apprendimento, le tecnologie immersive offrono un'opportunità molto importante. La VR, in particolare, si pone come uno strumento utile in termini di formazione e valutazione delle competenze [12]. Permette, infatti, di ricreare scenari lavorativi complessi con un elevato grado di fedeltà e coinvolgimento sensoriale [13]. Questo facilita l'apprendimento situato, dove la conoscenza è acquisita nel contesto specifico in cui deve essere applicata, aumentando il *transfer* di competenza al lavoro reale. Le simulazioni in VR, inoltre, sono idonee a ricreare condizioni inattese, guasti rari (*black swan events*), e situazioni di emergenza che sarebbero impraticabili o troppo pericolose da sperimentare nella realtà [14]. L'operatore può quindi esercitare e affinare la propria capacità di anticipare e rispondere alla variabilità, sviluppando così il knowledge-based behavior. La tecnologia immersiva non è poi solo un mezzo di erogazione, ma anche uno strumento di misurazione. Essa consente di misurare e monitorare l'impatto psico-fisico (presenza, carico cognitivo e *cybersickness* - disagio fisico e percettivo che può manifestarsi durante l'esposizione a ambienti virtuali immersivi, spesso associato a discrepanze tra movimento visivo e percezione corporea) [15,16] e le metriche comportamentali e decisionali degli utenti (tempo di reazione, sequenza di azioni, deviazioni procedurali, gestione dello stress), offrendo ai formatori dati oggettivi per la valutazione dell'efficacia della formazione [17].

Figura 3

Il modello Skill-Rule-Knowledge (J. Rasmussen)



(Rasmussen J. Skills, rules, and knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1983. Elaborazione Inail - Dipartimento di medicina, epidemiologia, igiene del lavoro e ambientale)

Grazie all'integrazione tra il modello SRK e il potere esperienziale della VR, il percorso formativo diventa un potenziale laboratorio di resilienza. Non forma soltanto un professionista tecnicamente competente – capace di eseguire con abilità e di applicare correttamente le procedure – ma anche una persona in grado di ragionare, adattarsi, decidere con lucidità quando le pressioni operative mettono in crisi il modello prescritto. In altri termini, prepara individui capaci di far funzionare il sistema anche quando il sistema devia da ciò che ci si aspettava.

2. L'INDAGINE NAZIONALE

Per comprendere come i principi della Safety-II e della Resilience Engineering trovino spazio nel tessuto produttivo italiano, è necessario allargare lo sguardo oltre i singoli casi e costruire una visione d'insieme. L'indagine nazionale di seguito descritta nasce proprio da questa ambizione: osservare come le aziende manifatturiere italiane interpretino la variabilità del lavoro, come gestiscano il divario tra ciò che è immaginato e ciò che viene realmente svolto, e in che misura riescano a integrare le capacità fondamentali della resilienza: monitorare, rispondere, anticipare e imparare. Parallelamente, l'indagine permette di osservare come tali principi si intreccino con il quadro più ampio dei cambiamenti introdotti dalla trasformazione digitale, con particolare riferimento alla formazione in materia SSL e all'adozione di metodologie innovative, tra cui soluzioni immersive di VR.

Il cuore dell'indagine è un dialogo con il sistema produttivo. Un dialogo articolato attraverso strumenti quantitativi e qualitativi, progettato per esplorare non solo le dichiarazioni di principio, ma anche le pratiche effettive che danno forma alla gestione quotidiana della sicurezza. Per favorire una riflessione più consapevole, ai partecipanti vengono presentati due scenari narrativi: un incidente e un quasi-incidente avvenuti nella stessa azienda immaginaria. Le storie non hanno lo scopo di descrivere casi reali, ma di proiettare i rispondenti in un contesto plausibile e familiare, costringendoli a confrontarsi con gli imprevisti che costellano ogni sistema sociotecnico.

Solo dopo questo momento di immersione narrativa, i rispondenti sono invitati a esprimere le proprie valutazioni: prima guardando dall'esterno alle storie proposte, e successivamente riflettendo sulla propria realtà aziendale. Una doppia prospettiva che permette di illuminare il divario tra ciò che viene ritenuto importante e ciò che viene realmente messo in atto.

2.1 LA PROGETTAZIONE DELL'INDAGINE NAZIONALE

La forza metodologica dell'indagine deriva dall'intreccio di due elementi concettuali: il modello Resilience Analysis Grid (RAG) e la potenza evocativa dello storytelling.

Il Resilience Analysis Grid (RAG)

Il RAG [18], sviluppato in letteratura per consentire una valutazione della resilienza organizzativa basata sulle quattro capacità proposte da Hollnagel, viene adottato come griglia concettuale per l'intera costruzione del questionario. L'obiettivo è quello di superare la vaghezza dei concetti teorici, trasformando le capacità di monitorare, rispondere, anticipare e imparare in indicatori e azioni operative specifiche e misurabili. Il suo principale vantaggio risiede nella flessibilità: pur non imponendo metodi rigorosi per la raccolta o l'analisi dei dati, offre un metodo strutturato per organizzare e disaggregare l'informazione.

Il processo di implementazione del RAG richiede che ciascuna abilità venga articolata e operazionalizzata in item specifici, così come illustrato in Tabella 1. Tipicamente, ogni item è associato ad almeno una domanda con una modalità di risposta definita e un punteggio corrispondente. La combinazione dei punteggi associati agli item di un potenziale sistemico fornisce la misura prossimale della capacità di resilienza corrispondente di un processo o di un'entità. Il RAG si avvale anche di rappresentazioni grafiche intuitive per supportare la visualizzazione e l'interpretazione immediata delle informazioni.

Tabella 1		Dimensioni RAG e item correlati
Dimensione RAG	Domanda	Motivazione
	Focus	
Monitorare	Sistema di notifica dell'ingresso senza DPI	Per rilevare comportamenti non sicuri in tempo reale monitorando gli accessi non autorizzati
	Sistema di monitoraggio e registrazione in tempo reale delle condizioni operative ambientali	Per osservare e tracciare le variabili ambientali critiche per il rilevamento tempestivo delle deviazioni
Rispondere	Sistema per impedire l'ingresso senza DPI	Per reagire prontamente alle minacce alla sicurezza impedendo accessi non sicuri
	Sistema per arrestare la tecnologia in caso di rilevamento di anomalie	Per rispondere efficacemente a condizioni anomale e mitigare i rischi associati
Anticipare	Organizzare attività di informazione e sensibilizzazione sull'importanza dei DPI	Aumentare la consapevolezza e preparare il personale ai potenziali rischi futuri
	Aggiornare la valutazione dei rischi per le nuove tecnologie in uso	Prevedere e affrontare i rischi associati all'implementazione di nuove tecnologie
	Formare il personale su come gestire situazioni impreviste	Preparare il personale ad agire in modo efficace in scenari incerti o imprevisti

Tabella 1 (segue)		Dimensioni RAG e item correlati
Anticipare	Formare il personale sull'uso corretto dei DPI	Garantire l'uso corretto dei DPI e prevenire futuri problemi di sicurezza
	Mettere a disposizione DPI per ogni lavoratore	Anticipare le esigenze e garantire la disponibilità dei DPI
	Valutare i rischi derivanti da cambiamenti straordinari nell'ambiente tecnologico	Identificare e mitigare i potenziali pericoli derivanti da condizioni operative atipiche
	Informare il personale in merito a cambiamenti straordinari dell'ambiente in cui è presente la tecnologia	Informare in modo proattivo sui cambiamenti che possono influire sulla sicurezza, consentendo adeguamenti anticipatori
Imparare	Avviare un'indagine sulle cause dell'evento	Analizzare gli incidenti e promuovere l'apprendimento organizzativo
	Aumentare il livello di conoscenza delle attrezzature tecnologiche associate all'evento	Migliorare la comprensione degli aspetti tecnici e trarre insegnamenti dagli eventi
	Rivedere la procedura relativa all'uso dei DPI	Aggiornare i protocolli esistenti sulla base dell'esperienza passata
	Rivedere i processi/ sistemi di comunicazione interna relativi ai cambiamenti delle condizioni ambientali	Migliorare il flusso di informazioni e incorporare il feedback per un migliore adattamento

Nonostante il RAG sia stato ampiamente testato in contesti ad alta criticità, la sua applicazione nel settore manifatturiero resta un campo relativamente meno esplorato [19]. Questa evidenza, insieme alla dimostrata capacità del RAG di supportare la gestione della SSL e di incrementare la consapevolezza sulla sicurezza tra i dipendenti [20], ne giustifica la sua adozione, fornendo un framework concettuale robusto per l'indagine.

Lo storytelling

La tecnica dello storytelling permette di mitigare il rischio di ottenere risposte reticenti o idealizzate. Lo storytelling consente, infatti, di raccontare storie per comunicare messaggi in modo coinvolgente ed efficace, sfruttando elementi come trama, personaggi ed emozioni per creare un legame con il pubblico. In tal modo è possibile stimolare interesse, creare connessioni emotive e rendere il messaggio più memorabile [21,22].

Nell'ambito dell'indagine viene adottato un approccio di storytelling basato sul caso di studio: due storie realistiche sono presentate ai rispondenti prima di compilare il questionario, al fine di stimolarli nel ragionare su questioni di sicurezza focali, estraniando gli stessi rispondenti dalla propria storia personale.

Il due scenari narrativi presentati, uno relativo ad un incidente con infortunio e un altro ad un evento di quasi-incidente – ambientati in un'azienda fittizia denominata "Compeso" – vengono illustrati nel seguito.

Storia 1

Il giorno 11 settembre 2023 l'azienda Compeso pianifica un intervento di manutenzione sull'aria condizionata di tutti i magazzini. Tuttavia, gli operatori continuano a lavorare normalmente nel magazzino, non percependo una temperatura diversa da quella solita. Un operatore della logistica di Compeso sta camminando in un corridoio all'interno del magazzino delle materie prime, quando improvvisamente SHARK lo colpisce da dietro al piede destro, viaggiando ad una velocità elevata. SHARK è un veicolo a guida autonoma compatto di ultima generazione, in grado di muoversi in tutte le direzioni e operare in spazi ristretti. Il funzionamento ottimale di SHARK richiede che nell'ambiente operativo vengano mantenuti livelli specifici di temperatura e umidità. La collisione tra l'operatore e SHARK è forte, e l'operatore viene portato in ospedale, dove gli diagnosticano una frattura al piede. L'operatore quel giorno non indossava le scarpe antinfortunistiche in quanto quella mattina la sua taglia non era disponibile nello spogliatoio.

Storia 2

Il giorno 11 settembre 2023 l'azienda Compeso pianifica un intervento di manutenzione sull'aria condizionata di tutti i magazzini. Tuttavia, gli operatori continuano a lavorare normalmente nel magazzino, non percependo una temperatura diversa da quella solita. Quella stessa mattina, il responsabile della manutenzione aveva avvisato un operatore della logistica di magazzino, Francesco, che SHARK mostrava comportamenti anomali rispetto ai giorni precedenti. SHARK è un veicolo a guida autonoma compatto di ultima generazione, in grado di muoversi in tutte le direzioni e operare in spazi ristretti. Il funzionamento ottimale di SHARK richiede che nell'ambiente operativo vengano mantenuti livelli specifici di temperatura e umidità. Durante il pomeriggio, mentre Francesco sta camminando in un corridoio all'interno del magazzino delle materie prime, nota che effettivamente SHARK, viaggiando ad una velocità elevata, ha perso il controllo e riesce ad evitare una collisione ed un conseguente infortunio. L'operatore quel giorno non indossava le scarpe antinfortunistiche in quanto quella mattina la sua taglia non era disponibile nello spogliatoio.

Sulla base di questi scenari, gli intervistati sono invitati a riflettere da una doppia prospettiva: dapprima la prospettiva esterna, valutando cioè l'importanza di determinate pratiche nel contesto esterno narrato, e successivamente la prospettiva interna, stimando l'effettiva implementazione di tali pratiche nella propria realtà aziendale. In Tabella 2 viene riportato un estratto del questionario dove vengono evidenziate le due prospettive.

Tabella 2	Estratto del questionario
Sezione 1: anagrafica	
Sezione 2.1: prospettiva esterna (caso incidente)	
Quanto sarebbe stata importante la presenza dei seguenti sistemi per evitare l'incidente nell'azienda Compeso? Q1. Sistema di notifica dell'ingresso senza DPI Q2. Sistema di monitoraggio e registrazione in tempo reale delle condizioni ambientali operative (ad es. temperatura, umidità) Q3. Sistema di prevenzione dell'ingresso senza DPI Q4. Sistema per arrestare la tecnologia quando vengono rilevate anomalie Quanto sarebbe stata importante, invece, l'implementazione delle seguenti azioni? Q5. Organizzare attività di informazione e sensibilizzazione sull'importanza dei DPI Q6. Aggiornare la valutazione dei rischi per le nuove tecnologie in uso Q7. Formare il personale su come gestire situazioni impreviste Q8. Formare il personale sull'uso corretto dei DPI Q9. Mettere a disposizione DPI per ogni lavoratore Q10. Valutare i rischi derivanti da cambiamenti straordinari nell'ambiente tecnologico Q11. Informare il personale in merito a cambiamenti straordinari nell'ambiente in cui è presente la tecnologia Per prevenire il ripetersi di questo tipo di incidente, quanto sarebbe importante che l'azienda Compeso implementasse le seguenti azioni? Q12. Avviare un'indagine sulle cause dell'evento Q13. Aumentare il livello di conoscenza delle attrezzature tecnologiche associate all'evento Q14. Rivedere la procedura relativa all'uso dei DPI Q15. Rivedere i processi/sistemi di comunicazione interna relativi ai cambiamenti delle condizioni ambientali	

Tabella 2 (segue)	Estratto del questionario
Sezione 2.2: prospettiva esterna (caso quasi-incidente)	
Quanto sarebbe stata importante la presenza dei seguenti sistemi per evitare il quasi-incidente nell'azienda Compeso?	
(Q1 - Q4)	
Quanto sarebbe stata importante, invece, l'implementazione delle seguenti azioni?	
(Q5 - Q11)	
Per prevenire il ripetersi di questo tipo di quasi-incidente, quanto sarebbe importante che l'azienda Compeso implementasse le seguenti azioni?	
(Q12 - Q15)	
Sezione 2.3: prospettiva interna	
Nella vostra azienda sono in vigore i seguenti sistemi e misure di sicurezza sul lavoro?	
(Q.1 - Q.11)	
A seguito di un incidente, la vostra azienda ha implementato le seguenti azioni?	
(Q.12 - Q.15)	
A seguito di un quasi incidente, la vostra azienda ha implementato le seguenti azioni?	
(Q.12 - Q.15)	

Questo metodo a doppio binario consente di misurare il gap tra importanza percepita e attuazione reale di pratiche di SSL.

La combinazione dello storytelling con il framework RAG in ambito di SSL rappresenta un approccio innovativo che permette di connettersi con i rispondenti a un livello emotivo e riflessivo, comunicando messaggi complessi in modo coinvolgente. È orientato, quindi, a promuovere il pensiero divergente e centrato sull'utente, sbloccando l'immaginazione e stimolando nuove idee e prospettive, risultando particolarmente adatto all'indagine di pratiche emergenti in contesti organizzativi.

L'acquisizione dei dati

Il processo di acquisizione dei dati è durato quattro mesi, da gennaio a maggio 2024, seguendo un iter articolato in cinque fasi principali:

- **costruzione delle liste di contatto:** utilizzando due database aziendali (registroaziende.it¹ e infocamere.it²), i ricercatori hanno filtrato i dati per codici Ateco pertinenti al settore manifatturiero, identificando un totale di 6.400 aziende da contattare;
- **contatto iniziale:** sono state contattate telefonicamente le segreterie aziendali per fissare appuntamenti o ottenere indirizzi e-mail. I contatti sono stati bilanciati tra Nord, Centro e Sud Italia;
- **comunicazioni personalizzate:** è stata inviata una e-mail personalizzata contenente una lettera di invito a partecipare all'indagine;
- **raccolta delle risposte:** in questa fase, il 70% dei rispondenti ha completato autonomamente il questionario, mentre il restante 30% ha optato per un'intervista telefonica guidata, ciascuna della durata approssimativa di 20 - 30 minuti;
- **follow-up:** sono stati eseguiti fino a tre tentativi di follow-up mirato con le aziende che avevano mostrato interesse ma non avevano completato il questionario entro 15 giorni dal contatto iniziale.

L'indagine ha raccolto un campione definitivo di risposte da 334 aziende distribuite su tutto il territorio nazionale, appartenenti a diversi codici Ateco del settore manifatturiero.

I dati raccolti sono analizzati utilizzando metodologie statistiche descrittive e quantitative. In particolare, viene implementato il test non parametrico di Mann-Whitney U [23] in quanto non richiede assunzioni sulla distribuzione della popolazione ed è appropriato per variabili ordinali, consentendo di verificare l'esistenza di differenze statisticamente significative tra le mediane di gruppi indipendenti (come, ad esempio, le aziende divise per dimensione o per adozione tecnologica).

2.2 I RISULTATI DELL'INDAGINE NAZIONALE

Dalle risposte raccolte emerge un quadro complesso, caratterizzato da consapevolezza consolidate e da pratiche ancora in evoluzione.

Innanzitutto, si riscontra una **forte percezione dell'importanza delle pratiche resilienti**. Gli intervistati attribuiscono un elevato valore alle azioni di sicurezza, in modo particolare in relazione alle capacità di anticipare (attraverso la formazione, l'aggiornamento dei rischi legati alle nuove tecnologie e la comunicazione dei cambiamenti) e di monitorare (mediante il controllo delle condizioni ambientali e l'utilizzo dei DPI).

In secondo luogo, l'analisi rivela un **gap significativo tra l'importanza percepita delle pratiche e la loro reale implementazione operativa** all'interno delle organizza-

¹ <https://registroaziende.it/>.

² <https://infocamere.it/>.

zioni. Questo divario indica che molte pratiche ritenute cruciali non sono ancora stabilmente integrate nei processi aziendali. Sebbene le capacità di monitorare e rispondere risultino più consolidate, quelle di anticipare e imparare mostrano le maggiori necessità di investimento.

Infine, emergono chiare [differenze legate alla dimensione aziendale e all'introduzione di nuove tecnologie](#) (Tabelle 3 e 4). Le aziende di medie e grandi dimensioni, così come quelle che hanno recentemente adottato innovazioni tecnologiche avanzate, mostrano livelli più elevati di implementazione delle pratiche resilienti, specialmente per quanto riguarda l'anticipazione e il monitoraggio. Questi dati suggeriscono che l'investimento in nuove tecnologie e la maggiore disponibilità di risorse sono fattori che accelerano l'adozione di un approccio alla sicurezza basato sulla resilienza.

Tabella 3 Riepilogo delle differenze significative tra gruppi su Dimensione aziendale		
Confronto su Dimensione aziendale (gr_1 = piccole imprese; gr_2 = medio-grandi imprese)	Azienda Compeso (Importanza)	Azienda intervistata (Presenza/Assenza)
Sistema per notificare l'ingresso senza DPI	gr_1 > gr_2 Caso infortunio	
Aggiornare la valutazione dei rischi derivanti dalle nuove tecnologie presenti		gr_2 > gr_1 Caso infortunio
Fare formazione su come gestire situazioni impreviste	gr_1 > gr_2 Caso infortunio	
Valutare i rischi derivanti da modifiche straordinarie all'ambiente in cui è presente la tecnologia		gr_2 > gr_1 Caso infortunio
Comunicare al personale le modifiche straordinarie all'ambiente in cui è presente la tecnologia		gr_2 > gr_1 Caso infortunio
Attivare un'indagine sulle cause dell'infortunio/incidente	gr_2 > gr_1 Caso infortunio Caso near-miss	gr_2 > gr_1 Caso infortunio Caso near-miss
Aumentare il livello di conoscenza delle apparecchiature tecnologiche associate all'infortunio/incidente		gr_2 > gr_1 Caso infortunio Caso near-miss

Tabella 4

Riepilogo delle differenze significative tra gruppi su Introduzione tecnologica

Confronto su Introduzione tecnologia (gr_1 = non introdotta; gr_2 = introdotta)	Azienda Compeso (Importanza)	Azienda intervistata (Presenza/Assenza)
Sistema per monitorare e registrare in tempo reale le condizioni ambientali operative		gr_2 > gr_1 Caso infortunio
Sistema per arrestare la tecnologia quando si rilevano le anomalie		gr_2 > gr_1 Caso infortunio
Comunicare al personale le modifiche straordinarie all'ambiente in cui è presente la tecnologia		gr_2 > gr_1 Caso infortunio
Attivare un'indagine sulle cause dell'infortunio/incidente	gr_2 > gr_1 Caso infortunio Caso near-miss	gr_2 > gr_1 Caso infortunio

Nel complesso, l'indagine conferma che la resilienza è riconosciuta come un valore strategico nel settore; tuttavia, la sua traduzione in una capacità operativa stabile, soprattutto per quanto riguarda la sistematicità con cui si anticipa e si impara dagli adattamenti quotidiani, richiede ancora investimenti mirati, in particolare nella formazione e nell'integrazione delle informazioni operative.

Implicazioni strategiche per la salute e sicurezza sul lavoro (SSL)

Le differenze emerse dall'analisi dei risultati offrono chiare direttive strategiche per il settore manifatturiero. L'indagine dimostra che le medie e grandi imprese, grazie alla maggiore disponibilità di risorse, implementano misure di SSL e protocolli di risposta in modo più sistematico rispetto alle piccole imprese. Queste ultime, spesso concentrate sulla tenuta di fronte alle sfide del mercato e gestite da una singola figura con compiti multidisciplinari, affrontano notevoli vincoli finanziari e di *know-how* che ne limitano la capacità di investimento in misure robuste. Tale disparità suggerisce la necessità di interventi mirati che forniscano alle piccole imprese soluzioni *cost-effective*, come programmi di formazione standardizzati e supporto governativo per l'adozione di pratiche strutturate.

Un altro risultato cruciale riguarda il ruolo del progresso tecnologico: le aziende che hanno adottato nuove tecnologie (ad esempio, sistemi di rilevamento in tempo reale o dispositivi indossabili) dimostrano una maggiore implementazione di misure di SSL. La tecnologia, quindi, non è solo un supporto, ma un catalizzatore per un approccio alla sicurezza proattivo e adattivo.

Infine, emerge una chiara differenza nella gestione degli eventi premonitori: le medie e grandi imprese manifestano una maggiore sensibilità ai quasi-incidenti, riconoscendoli come cruciali indicatori di vulnerabilità del sistema. Questa proattività è vitale, poiché l'analisi tempestiva dei quasi-incidenti è un meccanismo fondamentale di apprendimento e prevenzione. Le piccole imprese dovrebbero essere incoraggiate ad adottare un approccio simile, coltivando una cultura che veda la segnalazione dei quasi-incidenti non come un fallimento, ma come una preziosa opportunità di miglioramento continuo.

Considerazioni riguardanti l'uso dello storytelling

L'impiego di scenari narrativi non è stato solo un espediente per coinvolgere i partecipanti; esso ha funzionato come un ponte concreto tra gli astratti costrutti della RE, e la complessità vissuta in azienda. Sebbene la letteratura riconosca da tempo il potere dello storytelling, tale indagine compie un passo ulteriore. La narrazione è stata elevata da mero strumento pedagogico a strumento diagnostico. L'integrazione diretta delle storie in un questionario basato sul modello RAG permette di misurare come le organizzazioni percepiscono e attuano le capacità di resilienza. Questa combinazione, finora inedita, consente di sondare tematiche relative alle pratiche di SSL sia dalla prospettiva organizzativa sia da quella interna e vissuta, offrendo una visione completa delle dinamiche di sicurezza.

Processi, modelli organizzati e formazione

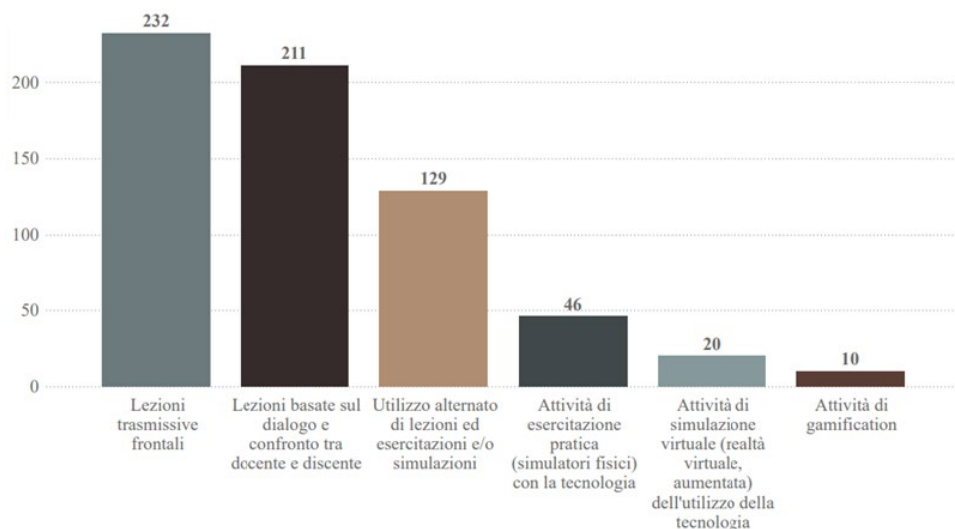
Oltre alle pratiche resilienti, l'indagine ha esplorato il modo in cui le aziende innovano i propri processi organizzativi e la formazione alla luce della trasformazione digitale. Il quadro regolatorio vigente in materia di SSL, definito dal d.lgs. 81/2008³ e successive integrazioni, attribuisce infatti alla formazione un ruolo strutturale all'interno dei modelli organizzativi di prevenzione. L'obbligo di garantire percorsi iniziali e di aggiornamento continuo, la definizione puntuale di informazione, formazione e addestramento e il legame con i requisiti dei modelli organizzativi del d.lgs. 231/2001 delineano un sistema in cui la qualità formativa è un prerequisito per l'efficacia complessiva della gestione della sicurezza. A ciò si aggiungono gli Accordi Stato-Regioni⁴, che richiedono percorsi caratterizzati da adeguatezza, specificità e comprensibilità, calibrati sulle mansioni, sui rischi e sulle caratteristiche dei lavoratori. Questo assetto normativo, rafforzato dai riferimenti internazionali sulla qualità della formazione non formale, spinge le organizzazioni verso modelli di progettazione basati sui processi, capaci di garantire coerenza, tracciabilità e misurabilità lungo l'intero ciclo formativo.

Parallelamente, il panorama tecnologico e organizzativo in cui queste attività si sviluppano è caratterizzato da dinamiche profonde.

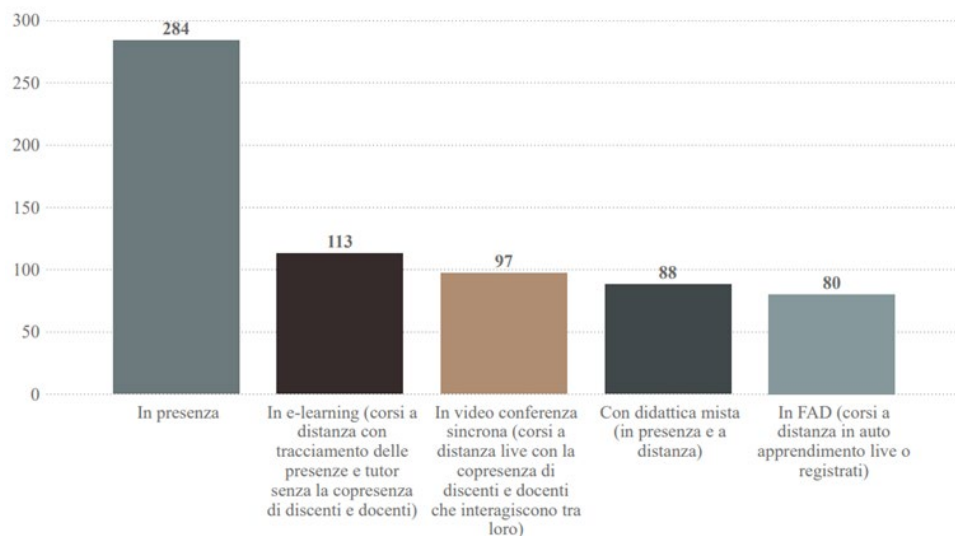
³<https://www.normattiva.it/uri-res/N2Ls?urn:nir:stato:decreto.legislativo:2008;81~art306>.

⁴<https://www.statoregioni.it/it/conferenza-stato-regioni/sedute-2025/seduta-del-17-aprile-2025/atti-17-aprile-2025/repertorio-atto-n-59csr/>.

--	--	--	--

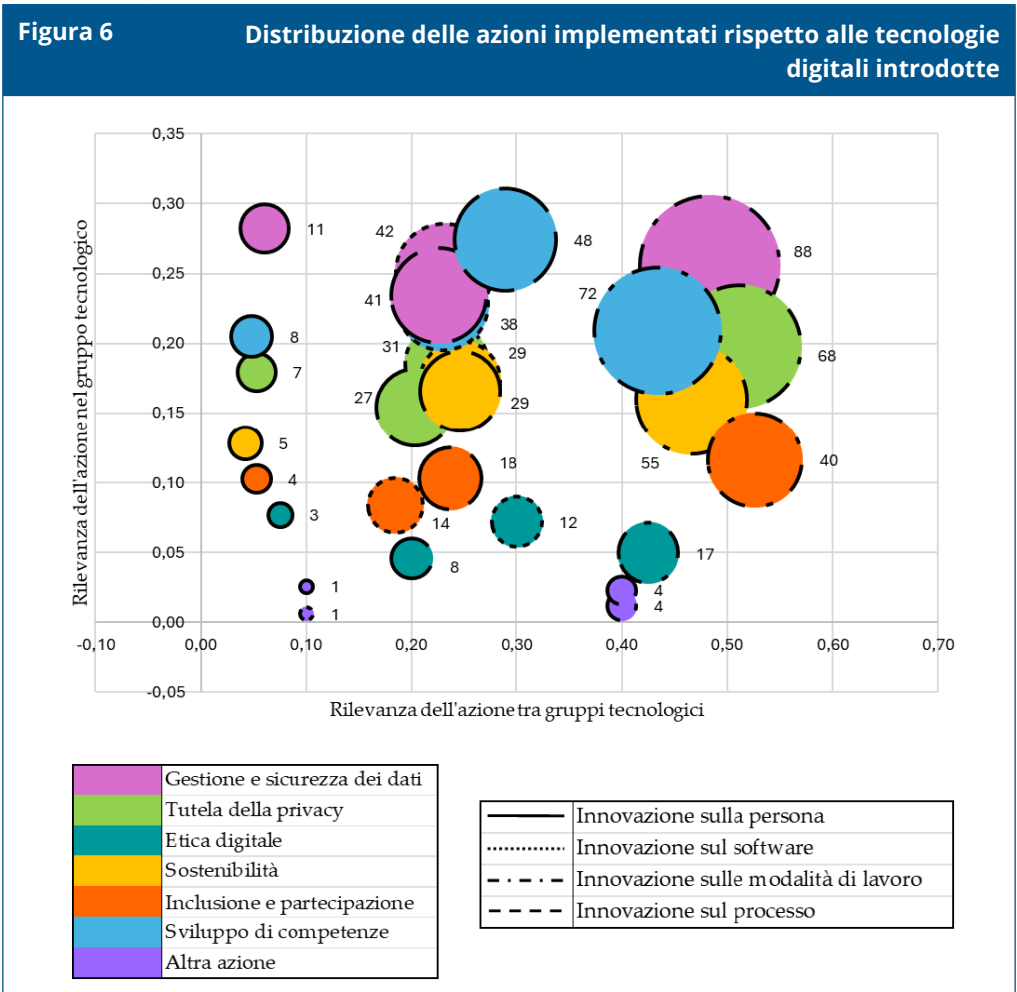
Figura 4**Metodologie per la formazione utilizzate negli ultimi 5 anni in azienda in materia di SSL**

(Progetto Fereo)

Figura 5**Modalità di erogazione dei corsi in materia di SSL**

(Progetto Fereo)

Le analisi bivariate mostrano che i cambiamenti nella formazione si concentrano prevalentemente sulle metodologie. Emergono *cluster* distinti legati al livello di maturità delle tecnologie introdotte, con innovazioni nei metodi di lavoro che si configurano come driver principali dei cambiamenti, seguite da innovazioni nei processi e nel software, mentre le tecnologie *per la persona* rappresentano ecosistemi emergenti e ancora poco integrati.



In questo scenario, la formazione rimane uno strumento centrale per sostenere la transizione digitale e garantire l'adattamento dei lavoratori a processi produttivi sempre più complessi. L'introduzione delle tecnologie immersive come strumenti

didattici, prevista nel nuovo Accordo Stato-Regioni del 17 aprile 2025⁵, rappresenta un punto di svolta. La VR può offrire opportunità avanzate: scenari immersivi e ripetibili, gestione sicura di situazioni rischiose, apprendimento esperienziale, possibilità di personalizzare i percorsi e di addestrare simultaneamente più operatori. Tuttavia, queste potenzialità sono bilanciate da sfide rilevanti: investimenti infrastrutturali elevati, necessità di competenze specialistiche nella modellazione degli scenari, rischi legati a discomfort fisico o cognitivo, assenza di metriche standardizzate per misurare l'efficacia e un necessario ripensamento del ruolo del formatore all'interno di un processo formativo tecnologicamente mediato.

Il loro impiego, pertanto, richiede un approccio critico, sostenibile ed eticamente orientato, supportato da linee guida chiare e da un'integrazione equilibrata con le metodologie tradizionali, al fine di garantire una reale tutela della SSL.

2.3 IL TOOL PER L'AUTOVALUTAZIONE

Sulla base dei risultati dell'indagine è stato sviluppato un tool digitale di autovalutazione per la SSL⁶. Questo strumento nasce direttamente dal modello RAG e dal questionario originale.

L'obiettivo di questo tool è duplice: da un lato, supportare concretamente le aziende offrendo un sistema di diagnosi *ready to use* per valutare il livello di resilienza delle proprie pratiche organizzative, spostando la lettura del sistema di SSL dalla semplice conformità normativa a una prospettiva di resilienza organizzativa; dall'altro consentire ai ricercatori una raccolta continua di dati, facilitando l'aggiornamento dei *benchmark* nazionali e il monitoraggio dell'evoluzione delle pratiche resilienti nel settore.

⁵<https://www.statoregioni.it/it/conferenza-stato-regioni/sedute-2025/seduta-del-17-aprile-2025/atti-17-aprile-2025/repertorio-atto-n-59csr/>.

⁶Autovalutazione della resilienza organizzativa per la prevenzione della salute e sicurezza sul lavoro <https://forms.gle/GsQgZXSxBU9CZEzYA>.

Il tool è progettato per essere compilato interamente online mediante un Google form (Figura 7) e richiede un tempo di compilazione circa 10 – 15 minuti.

Figura 7

Prima pagina del form da compilare online

Autovalutazione della resilienza organizzativa per la prevenzione della salute e sicurezza sul lavoro

In un contesto produttivo sempre più complesso e dinamico, la semplice conformità normativa non basta più. Oggi la vera sfida per chi si occupa di SSL è costruire un sistema capace di adattarsi, reagire e anticipare. Completando questo questionario di autovalutazione, riceverai all'indirizzo email indicato un report personalizzato che offre una fotografia della tua azienda attraverso la lente della *Resilience Engineering*.

Non condiviso

* Indica una domanda obbligatoria

Email *

La tua risposta

INAIL
ISTITUTO NAZIONALE PER L'ASSICURAZIONE
CONTRO GLI INFORTUNI SUL LAVORO

SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

FEREO
FORMAZIONE E RESILIENZA ENGINEERING ORGANIZZATIVA

Avanti

Pagina 1 di 6

Cancella modulo

(Progetto Fereo)

La compilazione è consigliata a chi gestisce il sistema aziendale della salute e sicurezza, in primis il responsabile del servizio di prevenzione e protezione (RSPP). Viene inoltre garantito ai compilatori che le informazioni raccolte vengano trattate in forma aggregata, esclusivamente per finalità di ricerca.

Una volta completata l'autovalutazione, l'utente riceve via e-mail un report personalizzato, la cui copertina è presentata in Figura 8.

Figura 8

Copertina del report personalizzato inviato alle aziende

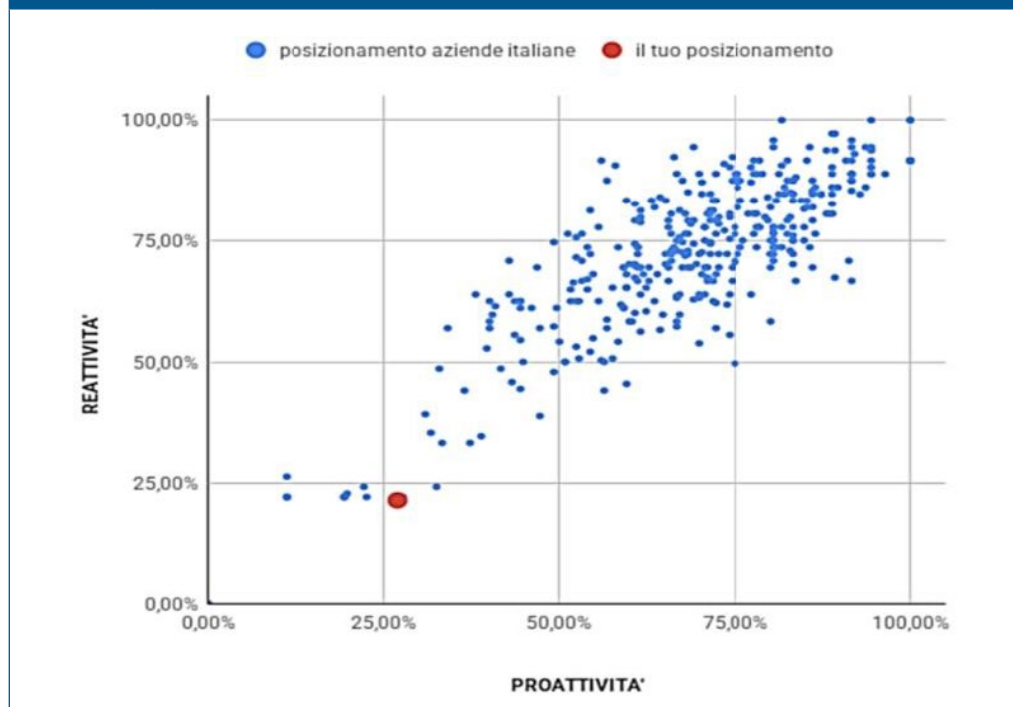


(Progetto Fereo)

Il report offre una fotografia della realtà aziendale attraverso la lente della RE, calcolando i potenziali di resilienza dell'azienda rispetto alle quattro dimensioni del modello RAG ed inserendo la stessa azienda in una nuvola di punti che rappresentano i posizionamenti delle 344 aziende che hanno partecipato all'indagine (un esempio viene presentato in Figura 9). Questo ultimo aspetto permette ad ogni organizzazione di confrontarsi con l'attuale panorama nazionale.

Figura 9

Esempio di posizionamento dell'azienda intervistata rispetto al panorama italiano, considerando le dimensioni di reattività e proattività in ottica di SSL



(Progetto Fereo)

Il report fornisce anche indicazioni chiare sulle aree già solide e quelle da potenziare per rafforzare prevenzione, monitoraggio, anticipazione e risposta in ottica di miglioramento continuo del sistema di SSL.

3. GLI STRUMENTI INNOVATIVI PER L'INFORMAZIONE E LA FORMAZIONE ALLA SSL

Per supportare e migliorare la gestione della SSL, è indubbio che le organizzazioni debbano investire in formazione ed informazione.

La formazione alla SSL è una misura generale di tutela e un obbligo imprescindibile per la prevenzione e la protezione della salute e sicurezza sul lavoro.

In un contesto lavorativo in continua evoluzione diventa fondamentale aggiornare non solo le pratiche di prevenzione, ma anche i metodi della formazione in materia di SSL soprattutto quando si tratta di preparare operatori e dipendenti ad affrontare ambienti e processi che cambiano rapidamente [12].

L'emanazione dell'Accordo Stato-Regioni del 17 aprile 2025 introduce un quadro normativo innovativo per la formazione obbligatoria in materia di SSL, che supera la precedente frammentazione normativa derivante dalla coesistenza di più accordi e introduce importanti novità anche sull'uso delle tecnologie digitali nella formazione. L'accordo attualmente rappresenta l'unico riferimento per tutti i soggetti per i quali è previsto l'obbligo formativo ai sensi del d.lgs. 81/2008, indicando contenuti minimi, durata, periodicità, modalità di erogazione, di valutazione e di verifica dell'efficacia dei percorsi formativi a carattere obbligatorio in SSL.

Un'attenzione particolare dell'accordo è stata rivolta all'utilizzo delle tecnologie digitali sia per quanto attiene le modalità di erogazione (e-learning e video conferenza sincrona), sia per le modalità didattiche di apprendimento in linea con quanto previsto anche dalla Raccomandazione del Consiglio europeo del 22 maggio 2018 relativa alle competenze chiave che richiede di promuovere molteplici approcci e contesti di apprendimento, anche con l'uso opportuno delle tecnologie digitali e dal Piano d'azione digitale europeo 2024 - 2027 che sostiene la necessità di ripensare la formazione nell'era digitale.

L'adozione delle tecnologie immersive di realtà aumentata, virtuale e mista, rappresenta una delle innovazioni più promettenti nella formazione alla SSL. Questi strumenti, attraverso dispositivi di visione, ascolto e manipolazione, consentono di aggiungere informazioni multimediali alla realtà percepita, generando ambienti interattivi e altamente realistici.

Anche i simulatori virtuali e fisici "bordo macchina" si dimostrano particolarmente utili per l'acquisizione di abilità manuali e pratiche. Essi possono essere integrati con sistemi digitali avanzati, combinando software immersivi con dispositivi reali in modo sinergico, risultando particolarmente utili per la formazione alla SSL.

È importante sottolineare che tali tecnologie non possono sostituire la formazione pratica obbligatoria prevista per specifiche attrezzature di lavoro, per ambienti confinati o sospetti di inquinamento, ma vanno intese come complemento potenziante di apprendimento.

La formazione alla SSL si delinea sempre più come uno strumento fondamentale per affrontare le sfide e i cambiamenti del mondo del lavoro, in termini culturali e di azione, ma occorre una visione innovativa che riesca a conciliare diritti e bisogni dei lavoratori con i processi di transizione in atto, che richiedono investimenti in campo formativo e adeguate competenze professionali.

La letteratura indica chiaramente che gli strumenti formativi devono innovarsi con la stessa intensità e continuità con cui si innovano i processi operativi e decisionali [24]. Se ciò non accade, il rischio è quello di creare un divario crescente tra ciò che il contesto richiede e ciò che gli utenti sono messi in condizione di comprendere e gestire. È un po' come cambiare automobile senza mai imparare davvero a guidarla: il mezzo migliora, ma la capacità di utilizzarlo rimane invariata.

Le ricerche, sia teoriche sia empiriche, convergono su un punto fondamentale: l'esperienza diretta, soprattutto quando costruita in modo realistico, rende l'apprendimento più solido, favorisce l'acquisizione di abilità pratiche e stimola risposte più articolate, includendo lo sviluppo di competenze trasversali come il *problem-solving* [19].

In un panorama reso ancora più complesso dalla presenza di numerosi rischi emergenti in materia di SSL [25], la formazione immersiva inizia a delinearsi come una delle strade più promettenti.

Nello specifico, la VR si è affermata come un potente strumento formativo in diversi ambiti [26]. La possibilità di ricreare ambienti realistici e, soprattutto, di gestire scenari a rischio in condizioni di totale sicurezza offre ai lavoratori un contesto di apprendimento esperienziale, controllato e privo di pericoli, fondato sul principio del *learning-by-doing*. Inoltre, la flessibilità dell'ambiente virtuale consente di formare più persone contemporaneamente e di costruire percorsi personalizzati: adattati al processo, alle caratteristiche individuali del lavoratore, alle sue esperienze, alle sue esigenze operative e al suo ruolo all'interno dell'organizzazione.

In questa prospettiva, innovare la formazione vuol dire sia innovare i contenuti formativi, che gli strumenti formativi.

L'innovazione dei contenuti punta alla progettazione di percorsi formativi strutturati ed efficaci; integrando modelli avanzati come l'*Analysis, Design, Development, Implementation, Evaluation* (ADDIE) [27] e il framework Skill-Rule-Knowledge (SRK) [11] è possibile definire percorsi formativi chiari che, iterativamente, possono adattare i contenuti alle necessità di diversi operatori e diversi livelli di competenza.

L'innovazione degli strumenti si propone invece di sfruttare le potenzialità della VR come tecnologia capace di migliorare l'apprendimento esperienziale, simulare variabilità operative e aumentare il coinvolgimento dei lavoratori.

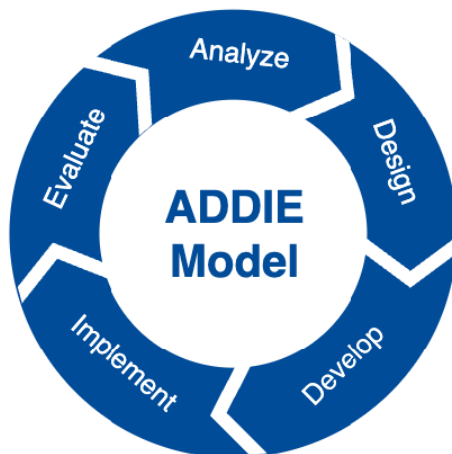
La combinazione di metodi rigorosi e strumenti immersivi, dunque, non rappresenta solo un avanzamento tecnico: diventa una strategia capace di dare forma a percorsi formativi più solidi, mirati e rispondenti alle esigenze dei contesti produttivi contemporanei. È in questa sinergia che la formazione sulla SSL trova la possibilità di rinnovarsi davvero, mantenendo saldo il suo obiettivo originario: preparare le persone a lavorare meglio, e soprattutto, in modo più sicuro.

3.1 L'INNOVAZIONE NEI CONTENUTI: DALL'ACQUISIZIONE DELLA CONOSCENZA ALLA GESTIONE DELL'IMPREVISTO

L'innovazione dei contenuti formativi è guidata dall'integrazione di due modelli di riferimento: il modello di progettazione didattica ADDIE e il framework cognitivo SRK. Tale integrazione avviene applicando sistematicamente i principi del paradigma Safety-II. Il modello ADDIE [27] – articolato nelle fasi di *Analysis*, *Design*, *Development*, *Implementation* ed *Evaluation* (Figura 10) – viene adottato per la sua capacità di fornire un approccio sistematico, rigoroso e scalabile alla progettazione di una soluzione formativa in VR dedicata alla SSL.

Figura 10

Le fasi costitutive del modello ADDIE



(Instructional Design: The ADDIE Approach)

La sua struttura sistematica permette di:

- **analizzare** i bisogni reali di SSL, osservando criticità, competenze e condizioni operative;
- **progettare** scenari coerenti con i rischi specifici e con le dinamiche dei contesti produttivi;
- **sviluppare** materiali formativi a sostegno della VR capaci di rappresentare fedelmente il lavoro quotidiano;
- **implementare** tali scenari in modo controllato, supportando l'apprendimento attivo degli operatori;
- **valutarne** l'efficacia sia in termini di acquisizioni tecniche sia di capacità decisionale.

L'integrazione dei principi Safety-II all'interno delle fasi dell'ADDIE permette, quindi, di ripensare la formazione non come un semplice esercizio di conformità alle procedure, ma come un'esperienza che aiuta a capire perché il lavoro funziona quasi sempre, nonostante pressioni, vincoli e variabilità.

Questa convergenza orienta l'intero impianto formativo verso cinque obiettivi chiave della Safety-II:

- **pensiero sistemico** [2]: promuovere la comprensione della complessità dei sistemi e delle loro interdipendenze, evidenziando come la sicurezza emerge dalle interazioni all'interno del sistema, piuttosto che dai singoli componenti. Il pensiero sistemico incoraggia a considerare il quadro d'insieme e a comprendere come i cambiamenti in una parte del sistema possano influenzarne l'intero funzionamento;
- **ingegneria della resilienza** [28]: concentrarsi sulla capacità del sistema di operare efficacemente in condizioni sia previste sia imprevedute, mirando a potenziare la capacità del sistema di adattarsi, apprendere e ripristinare la funzionalità dopo guasti o eventi inattesi, mantenendo così la sicurezza;
- **proattività** [29]: inglobare un approccio proattivo alla gestione della sicurezza, al fine di anticipare potenziali problemi e variazioni e preparare il sistema ad affrontarli prima che si traducano in eventi concreti;
- **apprendimento e adattabilità** [30]: stimolare l'apprendimento continuo sia dagli eventi negativi che positivi, incoraggiando le organizzazioni ad adattare le proprie pratiche di sicurezza sulla base delle lezioni apprese dalle operazioni quotidiane e dall'esperienza del settore nel suo complesso;
- **variabilità della performance umana come risorsa** [8]: riconoscere la persona come una risorsa preziosa anche in virtù dell'adattabilità umana e della variabilità delle prestazioni, che possono aumentare la resilienza del sistema e la sicurezza in condizioni variabili.

Parallelamente, il framework SRK guida la definizione degli obiettivi di apprendimento, assicurando che gli scenari coprano tre livelli di comportamento umano:

- **scenari skill-based**: azioni automatiche e routine consolidate, allenare attraverso esercizi pratici e ripetitivi in VR;
- **scenari rule-based**: applicazione consapevole di procedure e regole, resa possibile tramite scenari con scelte alternative e feedback immediato;
- **scenari knowledge-based**: gestione di eventi nuovi, imprevedibili o complessi, dove non esiste una regola prestabilita e occorre ragionare, anticipare e decidere.

In Tabella 6 viene presentata l'integrazione tra il modello ADDIE e il framework SRK.

Tabella 6 L'evoluzione del modello ADDIE attraverso il framework SKR per la progettazione di soluzioni formative in VR

Fase ADDIE	Implementazione attraverso il framework SRK
Analisi	Skill: identificare le competenze fisiche specifiche e i riflessi richiesti negli scenari di salute e sicurezza. Valutare la capacità della VR di simularli accuratamente. Analizzare i partecipanti (competenze, ruoli, esperienza, ecc.) per identificare le abilità specifiche.
	Rule: determinare l'insieme delle normative e procedure di SSL pertinenti al pubblico target. Analizzare eventuali lacune nella formazione attuale riguardo all'applicazione delle regole.
	Knowledge: comprendere i fondamenti teorici delle pratiche di SSL. Identificare lacune e misconcezioni nel pubblico target. Definire eventuali discrepanze accettabili rispetto alle regole.
Progettazione	Skill: pianificare scenari VR che consentano la pratica diretta delle abilità identificate in un ambiente simulato e controllato, migliorando memoria muscolare e tempi di reazione. Progettare situazioni a rischio senza regole specifiche disponibili, poiché non ci si aspetta che i partecipanti ne abbiano bisogno.
	Rule: progettare moduli interattivi che guidino gli apprendenti nei processi decisionali basati sulle procedure di SSL. Usare scenari ramificati per mostrare le conseguenze delle diverse scelte.
	Knowledge: strutturare contenuti per creare situazioni inattese in VR, dove emerge la complessità e nessuna regola si applica direttamente. Inserire elementi di variabilità, ad esempio strumenti mancanti, ambienti diversi dal solito, comportamenti imprevisti delle persone.
Sviluppo	Skill: creare simulazioni VR immersive e realistiche che richiedano agli apprendenti di svolgere compiti o reagire come nella vita reale. Integrare feedback per migliorare le abilità.
	Rule: sviluppare esperienze VR che stimolino l'applicazione delle regole in contesti diversi, offrendo feedback immediato per rinforzare procedure corrette e correggere errori.
	Knowledge: integrare lezioni interattive per esplorare e applicare le conoscenze di SSL in VR, favorendo apprendimento attivo. Gli scenari contengono molte variabili impreviste, gestibili combinando abilità e procedure acquisite negli scenari base.

Tabella 6 (segue)	L'evoluzione del modello ADDIE attraverso il framework SKR per la progettazione di soluzioni formative in VR
Implementazione	Skill: erogare sessioni di formazione VR focalizzate sulla pratica delle abilità, garantendo accessibilità e facilità d'uso per tutti. Monitorare e supportare gli apprendenti nell'uso della VR per esercitare abilità specifiche.
	Rule: implementare percorsi di formazione VR strutturati che introducano le regole e la loro applicazione in ordine crescente di complessità, garantendo comprensione e consolidamento.
	Knowledge: facilitare workshop o sessioni VR che coinvolgano gli apprendenti nell'applicazione delle conoscenze teoriche in scenari simulati, favorendo il trasferimento della conoscenza. Incoraggiare l'integrazione della gestione di variabili e situazioni impreviste con le procedure acquisite negli scenari base.
Valutazione	Skill: valutare le prestazioni degli apprendenti nelle simulazioni VR per misurare acquisizione e miglioramento delle abilità. Usare metriche come velocità, precisione e tempi decisionali.
	Rule: valutare la capacità degli apprendenti di applicare correttamente le regole in scenari VR diversi, usando quiz e simulazioni decisionali.
	Knowledge: misurare la comprensione e il consolidamento dei principi OSH tramite test pre- e post-formazione, analisi degli scenari e problem-solving applicato in VR.

In questa prospettiva, la formazione non mira solo a far sapere cosa fare, ma a rafforzare la capacità delle persone di agire efficacemente anche quando le condizioni cambiano, gli strumenti non sono disponibili, le informazioni sono incomplete o emergono eventi inattesi.

È così che l'innovazione dei contenuti diventa innovazione della cultura della sicurezza: dall'acquisizione della conoscenza alla gestione dell'imprevisto.

3.2 L'INNOVAZIONE NEGLI STRUMENTI: LA REALTÀ VIRTUALE COME STRUMENTO IMMERSIVO PER LA SSL

L'innovazione negli strumenti formativi si concentra sull'adozione della VR come mezzo per migliorare l'apprendimento in SSL. In questo passaggio di prospettiva, la VR non viene intesa solo come un supporto tecnologico, ma come un vero e proprio ambiente cognitivo: uno spazio in cui mettere alla prova comportamenti, decisioni e competenze operative in condizioni controllate e sicure.

La costruzione di indicazioni operative dedicate alla progettazione di soluzioni di VR per la formazione, nasce dall'evidenza che questo campo, ancora giovane e frammentato, richiede un quadro metodologico solido. La letteratura e le pratiche esistenti mostrano, infatti, una grande varietà di approcci, spesso privi di criteri condivisi per definire gli scenari, le modalità di interazione o i requisiti di usabilità [12]. In assenza di punti di riferimento strutturati, il rischio è quello di creare esperienze immersive incoerenti o poco efficaci dal punto di vista formativo.

Le linee guida dedicate alla VR assumono dunque una funzione essenziale: permettono di tradurre i principi teorici in soluzioni operative chiare, scalabili e valutabili. Il loro scopo è quello di accompagnare la progettazione di esperienze immersive che vadano oltre l'effetto di novità tecnologica, garantendo un allineamento reale con gli obiettivi di apprendimento, la coerenza narrativa degli scenari, l'adeguatezza delle interazioni e l'efficacia pedagogica complessiva.

Accanto a questa cornice metodologica, la realizzazione di uno strumento VR operativo rende possibile esplorare scenari realistici, osservare in modo sistematico il comportamento degli utenti e valutare in che misura vengano acquisiti i contenuti proposti. La VR si configura così come un laboratorio immersivo: un luogo in cui monitorare le decisioni, misurare la comprensione delle regole operative, valutare la gestione della variabilità e osservare le capacità di adattamento di fronte a situazioni impreviste.

Le sperimentazioni condotte attraverso l'uso della VR rendono possibile un confronto diretto tra formazione tradizionale e formazione immersiva, mettendo in luce il potenziale e i limiti di questa tecnologia nell'arricchire e consolidare le pratiche di SSL. Ciò che emerge è un quadro chiaro: quando opportunamente progettata, la VR non solo amplifica il coinvolgimento dei lavoratori, ma favorisce un apprendimento più profondo, situato e trasferibile alle condizioni reali di lavoro.

3.2.1 La progettazione di una soluzione di VR

Per assicurare che le soluzioni di VR per la formazione in SSL siano non solo coinvolgenti, ma anche metodologicamente rigorose e coerenti con gli obiettivi di apprendimento è stata sviluppata una linea operativa sistematica per la progettazione di soluzioni di VR.

La sua struttura nasce da un'analisi estensiva della letteratura scientifica, condotta secondo il metodo *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA) [31], integrando i contributi di un team multidisciplinare di esperti.

La guida così ottenuta non offre semplicemente una serie di indicazioni operative, ma delinea un percorso strutturato, articolato in nove elementi principali e ventinove item correlati, capaci di coprire l'intero ciclo di vita della progettazione di una soluzione immersiva, dallo sviluppo iniziale fino alla sua validazione. Questa struttura permette di superare una visione limitata alla sola creazione di scenari VR, invitando invece i progettisti a considerare sin dalle prime fasi aspetti come la coerenza con gli obiettivi formativi, la scalabilità della soluzione e le modalità di raccolta dati utili alla valutazione dell'efficacia.

I nove elementi chiave della linea guida, insieme ai ventinove item che ne articolano i contenuti, sono riportati in Tabella 7, e costituiscono una mappa completa per tradurre principi teorici in esperienze immersive solide, replicabili e adatte ai contesti produttivi contemporanei.

Tabella 7		Elementi e item che costituiscono la guideline per la progettazione di una soluzione di VR orientata alla formazione	
Analisi del contesto e progettazione dello strumento di VR			
1. Destinatari primari	1.1	tipologia di destinatari	
	1.2	settore	
2. Risultati di apprendimento attesi	2.1	obiettivo della formazione	
	2.2	sotto-obiettivi specifici	
	2.3	contenuto della formazione	
	2.4	valutazione conoscenza pre-formazione	
	2.5	protocolli e criteri di valutazione	
	2.6	obiettivo della formazione	
Sviluppo dello strumento di VR			
3. Tecnologia immersiva	3.1	hardware	
	3.2	software	
4. Sensi coinvolti	4.1	vista	
	4.2	udito	
	4.3	tatto	
	4.4	olfatto	
5. Visualizzazione dei contenuti	5.1	rendering	
	5.2	livello di interazione	
	5.3	tipo di trasferimento della conoscenza	
Implementazione dello strumento di VR			
6. Partecipanti	6.1	numero di partecipanti	
	6.2	tipologia di partecipanti	
7. Esperimento	7.1	durata	
	7.2	numero di sessioni	
	7.3	settaggio dell'ambiente esterno	

Tabella 7 (segue)

**Elementi e item che costituiscono la guideline
per la progettazione di una soluzione di VR
orientata alla formazione**

Validazione dello strumento di VR	
8. Efficacia post-training	8.1 tipo di valutazione
	8.2 tempistiche
	8.3 livello di personalizzazione
9. Impatto sull'utente	9.1 usabilità
	9.2 carico mentale
	9.3 <i>cybersickness</i>
	9.4 presenza
	9.5 esperienza

L'analisi del contesto e la progettazione dello strumento rappresentano il punto di partenza fondamentale: la definizione dei destinatari, dei loro profili e del settore di applicazione permette di calibrare contenuti e modalità formative, mentre la specificazione dei risultati di apprendimento attesi e dei criteri di valutazione assicura che la formazione sia misurabile e allineata a obiettivi concreti. Questo approccio evita l'eccessiva frammentazione delle esperienze immersive e favorisce un disegno mirato delle attività didattiche.

Nella fase di sviluppo dello strumento, la scelta della tecnologia immersiva, insieme alla progettazione multisensoriale e alla visualizzazione dei contenuti, consente di ottimizzare l'esperienza immersiva e l'interazione dell'utente. L'integrazione di stimoli visivi, uditivi, tattili e olfattivi favorisce un apprendimento più profondo, mentre la definizione del livello di interazione e del tipo di trasferimento della conoscenza garantisce che i contenuti siano efficaci e coerenti con gli obiettivi formativi. L'implementazione dello strumento richiede la pianificazione accurata dei partecipanti e della struttura sperimentale: numero e tipologia di utenti, durata e numero di sessioni, e la configurazione dell'ambiente esterno sono elementi cruciali per garantire la sicurezza, la replicabilità e la validità dell'esperienza formativa.

Infine, la fase di validazione dello strumento assicura che i risultati della formazione siano oggettivamente misurabili e che l'esperienza immersiva sia sostenibile per gli utenti. La valutazione dell'efficacia post-training, insieme all'analisi dei fattori umani come usabilità, carico mentale, *cybersickness*, senso di presenza ed esperienza complessiva, permette di identificare punti di forza e criticità, contribuendo a ottimizzare sia il design dei contenuti sia l'interazione complessiva.

In definitiva, tale linea di indirizzo offre spunti sia teorici che pratici. Dal punto di vista teorico, integra e crea sinergia tra i diversi aspetti affrontati in letteratura.

Dal punto di vista pratico, supporta ricercatori e sviluppatori nella progettazione di soluzioni complete e personalizzate, specifiche per il contesto e coerenti con gli obiettivi formativi prefissati. È quindi fondamentale definire tali requisiti fin dalle prime fasi del processo. La linea guida evidenzia inoltre la sfida insita nel progettare e implementare soluzioni universalmente applicabili, adeguate ed efficaci. Tuttavia, l'attenzione meticolosa ai dettagli e l'adeguatezza al contesto specifico rappresentano i tratti distintivi e i punti di forza di queste soluzioni.

3.2.2 Lo strumento proposto: design, implementazione e validazione

Il passaggio dalla teoria alla pratica formativa si concretizza attraverso lo sviluppo, l'implementazione e la validazione di un prototipo di formazione basato sulla VR, che rappresenta il banco di prova dei modelli metodologici adottati.

Il prototipo non è concepito solo come un mezzo per la fruizione di contenuti, ma come un laboratorio di osservazione e valutazione. Sfruttando la capacità della VR di simulare scenari realistici e monitorare in tempo reale il comportamento e le decisioni degli utenti, lo strumento permette di misurare non solo la comprensione delle regole operative, ma anche la gestione della variabilità e la capacità degli operatori di adattarsi a situazioni impreviste, in piena coerenza con i principi della RE.

La procedura di riferimento e gli scenari di VR

Il contesto applicativo scelto per lo sviluppo degli scenari VR è quello delle procedure di manutenzione, in particolare la procedura Lock-Out, Tag-Out) (LOTO). Questa scelta è motivata dalle evidenze fornite dall'Agenzia europea per la sicurezza e la salute sul lavoro (Eu-Osha) [32] che identifica le attività relative alle procedure di manutenzione LOTO critiche e altamente suscettibili agli infortuni professionali, a causa dell'esposizione a fonti di energia pericolose.

La procedura LOTO è un protocollo di sicurezza a più fasi, rigorosamente definito per isolare e mettere in sicurezza le fonti di energia pericolose prima di avviare la manutenzione [33]. Essa si articola tipicamente in sei passaggi sequenziali: (1) preparazione allo spegnimento, (2) spegnimento della macchina, (3) isolamento delle fonti di energia, (4) applicazione dei dispositivi di blocco (lucchetti) e tag di avvertimento, (5) dissipazione dell'energia residua e (6) verifica dell'isolamento.

Nonostante il rigore procedurale, la letteratura evidenzia una persistente discrepanza tra gli standard di sicurezza stabiliti e la loro attuazione pratica, con molti incidenti legati a un uso inadeguato o non autorizzato delle pratiche LOTO [34]. Fattori come la pressione temporale, le richieste di produttività e le barriere comunicative possono portare gli operatori a sottovalutare o saltare le misure di sicurezza. Il prototipo VR si concentra sulla manutenzione di un compressore industriale, un contesto che richiede la gestione di tre distinte fonti di energia (elettrica, pneumatica e termica) e l'interazione con diversi dispositivi di blocco. Nello specifico, un compressore industriale è una macchina che converte energia meccanica in energia pneumatica, aspirando gas (spesso aria) e aumentandone la pressione, diminuendone il volume, per poi immagazzinarlo e utilizzarlo per alimentare uten-

sili, macchinari o processi in vari settori industriali, come verniciatura, sabbiatura, gonfiaggio e confezionamento.

La simulazione in VR ricrea l'intero processo LOTO, includendo aspetti quali la messa in sicurezza del lavoratore (dotazione dei DPI), e l'informazione agli altri operatori.

Nella pratica sono stati sviluppati in VR scenari differenziati, il cui contenuto formativo ricalca il framework SRK. L'obiettivo di tale strumento è, infatti, formare i lavoratori non solo sull'applicazione delle regole, ma sulla capacità di adattamento e di *problem-solving* richiesta in un ambiente di lavoro dinamico. In particolare:

- **scenario di base - trail & error (formazione skill- e rule-based):** in questo scenario, l'obiettivo è l'internalizzazione automatica dei passaggi LOTO e l'applicazione delle procedure apprese. L'ambiente riproduce una situazione ideale in cui "tutto va come dovrebbe". Gli errori, come saltare un passaggio, generano un feedback immediato e richiedono il riavvio della procedura, rafforzando così il comportamento rule-based.
- **Scenario avanzato - LOTO & variability (formazione knowledge-based):** questo scenario introduce elementi di imprevedibilità e variabilità. La semplice aderenza procedurale non è sufficiente. Il partecipante deve combinare la conoscenza procedurale con la valutazione della situazione e il *decision-making*, interagendo con avatar e gestendo ostacoli inattesi (come problemi di comunicazione o pericoli emergenti). L'obiettivo è stimolare il livello cognitivo più elevato (knowledge-based, appunto), dove l'operatore deve analizzare la situazione ed implementare una soluzione nuova e non programmata.

L'applicazione in VR è stata sviluppata mediante il motore grafico Unity [35] ed è destinata all'utilizzo con il visore Meta Quest 3 [36]. L'ambiente virtuale riproduce un capannone industriale all'interno del quale sono collocati i macchinari e gli oggetti necessari per l'esecuzione della pulizia del filtro di un compressore ad aria secondo la procedura LOTO (Figura 11).

Figura 11

Ambiente virtuale



(Progetto Fereo)

La simulazione guida l'utente attraverso una sequenza strutturata di azioni che ricalda fedelmente i passaggi operativi della procedura reale. In particolare, il flusso prevede le seguenti fasi:

1. l'utente deve recarsi presso uno scaffale dedicato, sul quale sono disponibili i dispositivi e gli strumenti necessari allo svolgimento dell'attività, tra cui casco, guanti, occhiali protettivi, cuffie antirumore, multimetro e lucchetti;
2. prima di avviare la procedura, l'utente è tenuto a informare un collega, rappresentato da un avatar presente nella scena, dell'inizio delle operazioni di manutenzione sul compressore;
3. l'utente deve procedere allo spegnimento del compressore e applicare un primo lucchetto per segnalare che la macchina è oggetto di un intervento di manutenzione;
4. successivamente, è necessario individuare l'interruttore corretto sul quadro elettrico, interrompere l'alimentazione elettrica e applicare il relativo dispositivo di blocco;

5. l'utente deve chiudere la valvola del compressore, applicare un lucchetto e sfiatare il serbatoio al fine di ridurre la pressione interna;
6. dopo aver verificato che temperatura, tensione e pressione del compressore siano effettivamente ai valori minimi di sicurezza, è possibile procedere alla pulizia del filtro;
7. al termine dell'intervento, l'utente deve ripercorrere l'intera procedura in ordine inverso, rimuovendo progressivamente i dispositivi di blocco e riavviando correttamente il compressore.

In Figura 12 è riportato un esempio dell'applicazione del lucchetto sul compressore. Nello scenario di base, l'utente può eseguire l'intera procedura seguendo un tutorial integrato direttamente nell'applicazione, senza necessità di istruzioni esterne. Tale modalità è finalizzata a supportare l'apprendimento guidato e l'automatizzazione dei passaggi procedurali.

Figura 12**Applicazione del lucchetto al compressore ad aria**

(Progetto Fereo)

Nello scenario avanzato, invece, vengono introdotti ulteriori elementi di complessità attraverso l'inserimento di fattori di variabilità all'interno dell'ambiente virtuale. Questi elementi devono essere individuati e correttamente segnalati dall'utente. A tal fine, in prossimità delle diverse postazioni operative sono presenti cartelli virtuali (Figura 13), che simulano l'azione di comunicare una criticità a un superiore. Le variabilità implementate comprendono, ad esempio, la presenza di DPI mancanti o danneggiati, l'assenza di lucchetti, la presenza di un lucchetto già applicato su un macchinario (indicativa di un'altra attività di manutenzione in corso), pulsanti di comando guasti o etichette errate sul quadro elettrico (Figura 13).

Figura 13

Esempio di variabilità introdotta nello scenario avanzato



(Progetto Fereo)

Al fine di garantire una esperienza che risulti al contempo coinvolgente, chiara ed efficace dal punto di vista didattico, le meccaniche di interazione sono state progettate per essere il più possibile semplici e intuitive. L'utente, rappresentato nell'ambiente virtuale da un avatar, interagisce con gli oggetti tramite i controller del visore e riceve indicazioni visive contestuali all'interno dell'applicazione (Figura 14) relative ai comandi da utilizzare per ciascuna azione, ad esempio il pulsante X/A per l'applicazione di un lucchetto. Inoltre, al fine di rendere esplicito all'utente il corretto completamento di alcune azioni operative (ad esempio l'attivazione o la disattivazione di un interruttore del quadro elettrico), è stato integrato un feedback vibrotattile da parte dei controller, che fornisce una conferma sensoriale immediata dell'interazione avvenuta.

Lo spostamento all'interno dell'ambiente virtuale è stato implementato mediante una modalità di teletrasporto: l'utente seleziona il punto desiderato nello spazio e viene istantaneamente trasferito in quella posizione. Tale scelta progettuale consente di ridurre l'insorgenza di sintomi legati alla *cybersickness* [37].

Qualora l'utente commetta un errore nell'esecuzione della procedura, questo viene segnalato attraverso una schermata di avviso di colore rosso, che esplicita anche le potenziali conseguenze dell'azione errata (ad esempio: "sei morto folgorato per non aver interrotto correttamente l'alimentazione"). In tali casi, la simulazione viene interrotta e l'utente viene riportato all'inizio della procedura, favorendo un meccanismo di apprendimento basato sul feedback immediato.

Figura 14

Indicazioni sull'utilizzo dei controller



(Progetto Fereo)

La prima fase di valutazione della soluzione implementata si è concentrata sull'analisi della *Quality of Experience* (QoE). In ambito scientifico, la QoE è definita come la valutazione complessiva dell'esperienza vissuta dall'utente, risultante dall'interazione tra le sue percezioni soggettive e le caratteristiche del sistema e del contesto d'uso [38]. Essa è influenzata da fattori umani, legati al modo in cui l'utente percepisce e interpreta l'esperienza; da fattori di sistema, connessi alle tecnologie e alle modalità di interazione adottate; e da fattori di contesto, che nel caso specifico riguardano l'utilizzo della realtà virtuale per la formazione in ambito SSL.

Per valutare tali aspetti, l'approccio comunemente adottato in letteratura, e seguito anche nel contesto di questo progetto, prevede l'impiego di questionari standardizzati. In particolare, i fattori ritenuti maggiormente rilevanti per la soluzione VR sviluppata sono stati i seguenti:

- insorgenza di sintomi legati alla *cybersickness*, valutata mediante il questionario CSQ-VR [39], composto da sei domande relative a nausea, senso di svenimento, disorientamento, perdita di equilibrio, stanchezza e disturbi visivi;
- carico cognitivo, misurato attraverso il questionario NASA-TLX [40], che consente di valutare lo sforzo mentale e fisico richiesto per l'esecuzione del compito;
- sensazione di presenza, intesa come il grado in cui l'utente percepisce di essere fisicamente presente all'interno dell'ambiente virtuale [41]. Tale dimensione è stata valutata mediante il *Presence Questionnaire* (PQ) [42], che analizza aspetti quali il realismo percepito, la naturalezza delle interazioni e il livello di coinvolgimento durante l'esperienza;
- usabilità, definita come il grado di efficacia, efficienza e soddisfazione con cui un utente può utilizzare un sistema per raggiungere determinati obiettivi. Per la sua valutazione è stato utilizzato il *System Usability Scale* (SUS), un questionario ampiamente validato composto da dieci affermazioni che forniscono una misura globale dell'usabilità percepita del sistema [43].

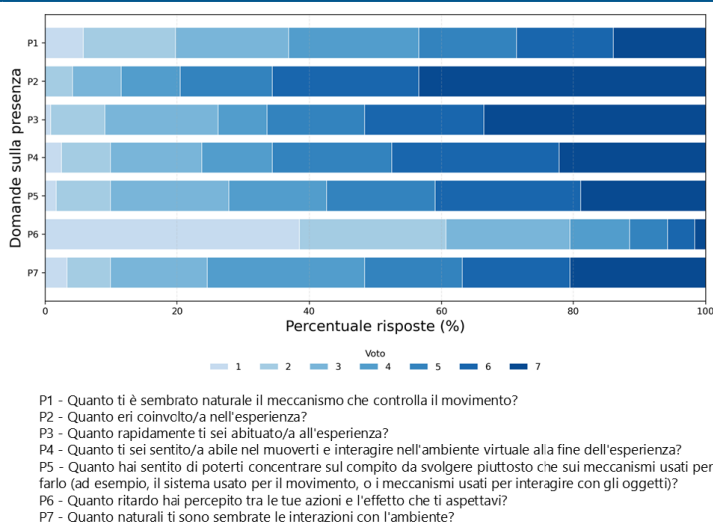
Al termine della somministrazione dei questionari standardizzati, ai partecipanti è stato, inoltre, richiesto di fornire un feedback aperto, finalizzato a raccogliere suggerimenti qualitativi per il miglioramento dell'esperienza.

La fase preliminare di valutazione ha coinvolto complessivamente 122 partecipanti, equamente distribuiti per genere (61 uomini e 61 donne), con un'età compresa tra i 18 e i 68 anni. Le attività di sperimentazione si sono svolte in quattro occasioni differenti: due sessioni presso Inail, una durante l'evento Maker Faire Rome 2024 e una nel contesto dell'evento Ecomondo 2024.

Il riscontro complessivo emerso dalla valutazione è stato ampiamente positivo. Tuttavia, alcune dimensioni indagate hanno evidenziato una maggiore eterogeneità nelle risposte, suggerendo margini di miglioramento. In Figura 15 sono mostrate le risposte ottenute per il questionario sulla presenza (PQ). In particolare, sono emerse opinioni diversificate in relazione alla naturalezza del meccanismo di movimento all'interno dell'ambiente virtuale (P1 in Figura 15). Tale risultato può essere ricondotto alla modalità di spostamento adottata nella simulazione, ossia il teletrasporto. Trattandosi di una modalità di locomozione non naturale, essa può aver influenzato negativamente la percezione di realismo da parte di alcuni utenti. Ulteriori osservazioni riguardano la capacità di concentrazione sul compito rispetto ai meccanismi di interazione (P5 in Figura 15). In questo caso, la variabilità delle risposte sembra essere legata principalmente alla brevità dell'esperienza, che potrebbe non aver consentito a tutti i partecipanti di acquisire piena familiarità con i comandi e le modalità di interazione.

Figura 15

Risposte al questionario sulla sensazione di presenza

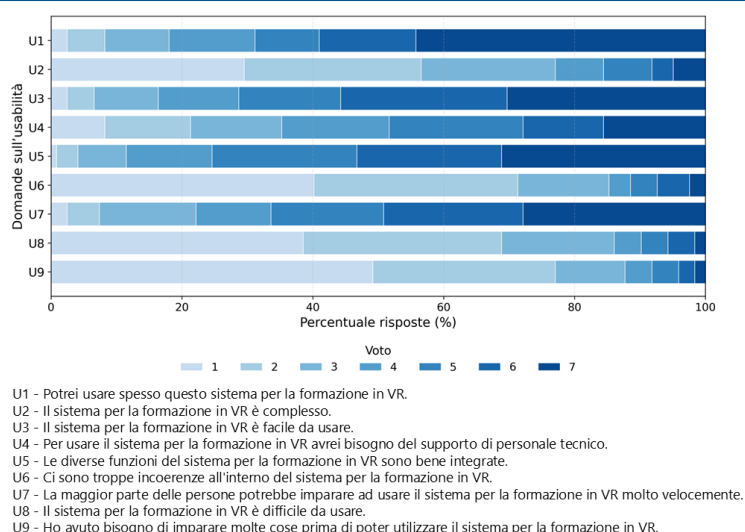


(Progetto Fereo)

In Figura 16 sono mostrati i risultati ottenuti in termini di usabilità. Nel complesso, la maggior parte dei riscontri è positiva, ma una parte dei partecipanti ha manifestato una percezione non univoca rispetto alla necessità di supporto tecnico per l'utilizzo del sistema (U4 in Figura 16). Anche in questo caso, la durata limitata dell'esperienza e l'assenza di una preparazione preliminare strutturata possono aver influito sulle risposte. È tuttavia importante sottolineare che il prototipo è stato concepito per essere inserito all'interno di un percorso formativo più ampio, preceduto da un'adeguata fase introduttiva in cui il personale tecnico illustra le funzionalità del sistema e le modalità di utilizzo.

Figura 16

Risposte al questionario sull'usabilità del sistema



(Progetto Fereo)

I pareri qualitativi raccolti confermano nel complesso una valutazione molto positiva dell'esperienza formativa in VR, frequentemente descritta come efficace, coinvolgente e innovativa. Numerosi contributi sottolineano l'utilità di affiancare all'esperienza immersiva una fase preliminare di preparazione, finalizzata alla familiarizzazione con i comandi, i controller e le modalità di interazione. Altri suggerimenti riguardano il potenziale miglioramento del realismo della simulazione, attraverso una grafica più definita, interazioni più naturali con oggetti e avatar, un feedback tattile e sensoriale più ricco e una maggiore corrispondenza tra movimenti virtuali e gesti reali. Nel complesso, i riscontri confermano il forte interesse verso l'impiego della VR in ambito formativo e ne auspicano una progressiva integrazione nei contesti lavorativi.

La formazione tradizionale e la formazione in VR a confronto

Per verificare l'efficacia della soluzione formativa in VR rispetto alla formazione frontale tradizionale, è stato condotto un esperimento ad-hoc.

Il protocollo sperimentale prevede la suddivisione dei partecipanti in due gruppi distinti: il gruppo 1 viene sottoposto a un percorso di formazione tradizionale, erogato tramite lezioni frontali; il gruppo 2 utilizza esclusivamente la formazione in VR. Il contenuto formativo, in entrambi i casi, è strutturato in due fasi sequenziali che riflettono i diversi livelli cognitivi del framework SRK: la fase 1 focalizzata su skill e rule, e la fase 2 orientata al livello knowledge.

Ogni sessione, della durata complessiva variabile tra 30 minuti e un'ora, inizia con una fase di introduzione di circa trenta minuti. In questa fase preliminare, i partecipanti firmano il consenso informato e compilano un questionario anagrafico. Solo per coloro che partecipano alla formazione in VR, è necessario uno screening tramite test di Snellen e tavole di Ishihara per la valutazione visiva, oltre alla compilazione di un questionario per rilevare la *cybersickness*. Per garantire la massima confrontabilità tra i gruppi, l'introduzione iniziale alla procedura LOTO include elementi relativi a tutti e tre i livelli skill, rule e knowledge, e prevede un test iniziale sulle conoscenze pregresse. Inoltre, il test sulle conoscenze somministrato prima, durante e dopo la formazione, è il medesimo per i due gruppi.

Successivamente, i gruppi affrontano le due fasi di formazione.

- **Fase 1 - formazione skill/rule-based:** al gruppo 1 viene erogata una lezione frontale circa le procedure LOTO in generale e quelle specifiche del compressore. Il gruppo 2 svolge la formazione in VR in uno scenario progettato senza variabilità, potendo ripetere la procedura più volte per circa 30 minuti. Al termine, entrambi i gruppi sostengono lo stesso test sulle conoscenze, a risposta multipla, con domande sul protocollo LOTO e sulla procedura del compressore; tale test contiene altresì elementi relativi alla gestione di situazioni impreviste, per valutare la capacità di riadattare quanto appreso a nuovi contesti. Il gruppo 2 compila anche questionari sulla qualità dell'esperienza.
- **Fase 2 - formazione knowledge-based:** al gruppo 1 viene erogata una lezione frontale circa tematiche di gestione della variabilità, ivi incluse le differenze concettuali sulle variabilità del lavoro - WAD e WAI - e sulla necessità di sviluppare capacità a livello knowledge per fronteggiare imprevisti; tale lezione è seguita da una discussione aperta tra formatori e formandi. Il gruppo 2 viene immerso in uno scenario VR con variabilità, tipico del livello knowledge, potendo sperimentare più situazioni impreviste in ordine casuale per un massimo di 30 minuti. Anche in questa fase, vengono raccolti dati sulla *cybersickness* e sulla qualità dell'esperienza per il gruppo 2. Successivamente, entrambi i gruppi rispondono al medesimo test sulle conoscenze (lo stesso della fase 1).

L'analisi dei risultati si concentra principalmente su due aspetti: il confronto tra i gruppi 1 e 2 dopo la fase 1 per valutare l'efficacia dello strumento innovativo (in termini di formazione); la valutazione del miglioramento delle conoscenze tra la

fase 1 e la fase 2, sia all'interno dello stesso gruppo che tra i due gruppi, per misurare se e come la presentazione di contenuto a livello knowledge possa supportare il consolidamento delle conoscenze formative.

La sperimentazione ha coinvolto complessivamente 40 partecipanti, suddivisi equamente nei due gruppi sperimentali (20 nel gruppo 1 e 20 nel gruppo 2), con una età compresa tra i 21 e i 48 anni. Per quanto riguarda il genere, il 45% dei partecipanti ha dichiarato di essere di genere femminile, il 48% di genere maschile, mentre il 2% ha preferito non rispondere. Le percentuali relative alle risposte corrette sono riportate in Tabella 8 in termini di media e deviazione standard globali, e anche rispetto alle domande focalizzate sul livello skill/rule (S/R) e knowledge (K). Nella fase iniziale (Fase 0, prima della formazione), i risultati mostrano percentuali medie di risposte corrette pari a circa il 29,6% per il gruppo 1 e al 27,5% per il gruppo 2. Questo dato indica un livello di conoscenze pregresse simile tra i due gruppi. L'analisi per tipologia di domanda evidenzia come, in entrambi i gruppi, le percentuali di risposte corrette siano più elevate per le domande di tipo skill/rule rispetto a quelle di tipo knowledge, suggerendo una maggiore familiarità iniziale con aspetti procedurali rispetto a quelli concettuali e di gestione della variabilità.

Dopo la prima fase di formazione, le percentuali complessive di risposte corrette si attestano attorno al 26,2% per il gruppo 1 e al 27,7% per il gruppo 2. L'analisi disaggregata per tipologia di domanda mette in luce differenze più rilevanti. In particolare, nelle domande di tipo skill/rule il gruppo che ha seguito la formazione in VR raggiunge una percentuale media di risposte corrette superiore rispetto al gruppo sottoposto a formazione tradizionale (circa 36,3% contro 30,0%). Questo risultato suggerisce che l'apprendimento esperienziale e la possibilità di interagire direttamente con la procedura in ambiente immersivo favoriscano una migliore acquisizione delle regole operative. Al contrario, per le domande di tipo knowledge le percentuali rimangono più basse e comparabili tra i due gruppi, coerentemente con il fatto che questa tipologia di contenuto non costituisce il focus principale della prima fase formativa.

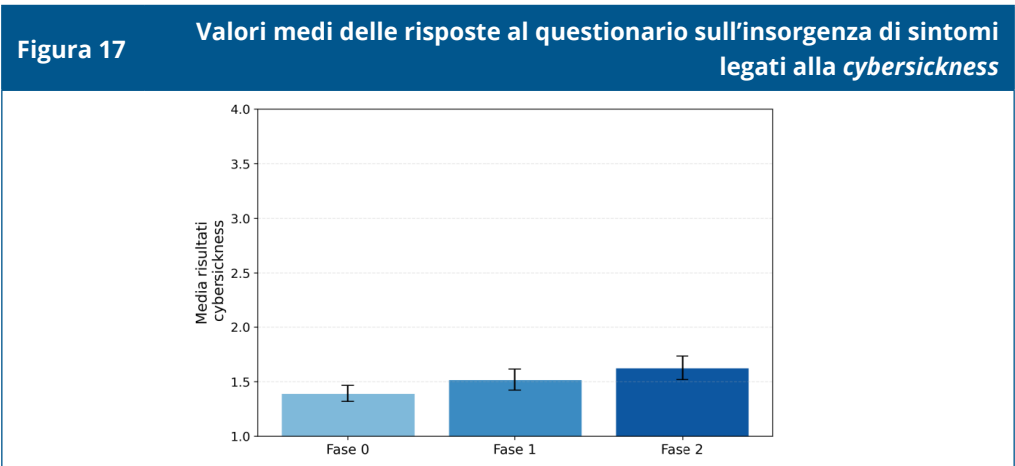
Nella seconda fase, orientata allo sviluppo di competenze di tipo knowledge e alla gestione della variabilità, si osserva un miglioramento ulteriore delle prestazioni complessive in entrambi i gruppi. Le percentuali medie di risposte corrette raggiungono circa il 31,2% nel gruppo 1 e il 33,1% nel gruppo 2. L'analisi per tipologia di domanda mostra come l'incremento sia distribuito in modo differenziato: le domande di tipo skill/rule continuano a presentare valori medi più elevati, in particolare per il gruppo VR, che raggiunge circa il 41,9%, mentre il gruppo tradizionale si attesta intorno al 34,4%. Parallelamente, le domande di tipo knowledge evidenziano un miglioramento rispetto alle fasi precedenti in entrambi i gruppi, indicando che l'introduzione di contenuti e scenari orientati alla variabilità contribuisce al consolidamento delle conoscenze concettuali.

Nel complesso, il confronto tra gruppi e tra tipologie di domanda suggerisce che entrambe le modalità formative risultano efficaci nel supportare l'apprendimento, ma con contributi differenti: la formazione tradizionale appare adeguata per il trasferimento di conoscenze di base, mentre la formazione in VR mostra un potenziale vantaggio nell'acquisizione e nel mantenimento delle competenze di tipo skill/rule

e nel supportare una progressione più marcata lungo le diverse fasi formative. L'integrazione di contenuti di livello knowledge, in particolare quando supportata da scenari immersivi e variabili, sembra favorire un consolidamento più profondo delle conoscenze, rilevabile nel confronto tra le diverse fasi successive.

Tabella 8		Tabella riassuntiva dei risultati (percentuale di risposte corrette, media)		
Fase	Gruppo	Totale (%)	S/R (%)	K (%)
Fase 0	1	29,6 ± 11,6	37,1	19,0
	2	25,5 ± 12,7	32,9	20,0
Fase 1	1	26,2 ± 9,1	30,0	20,0
	2	27,7 ± 9,8	36,3	14,0
Fase 2	1	31,2 ± 8,1	34,4	26,0
	2	33,1 ± 10,3	41,9	19,0

In termini di *cybersickness* e QoE, i risultati ottenuti sono stati anche in questo caso molto positivi, indicando che lo strumento di formazione in VR risulta complessivamente ben tollerato e adeguato dal punto di vista dell'esperienza utente. I valori raccolti tramite i questionari dedicati non evidenziano infatti la presenza di sintomi significativi di malessere (Figura 17), suggerendo che la durata delle sessioni, le scelte progettuali adottate e le modalità di interazione previste siano compatibili con un utilizzo prolungato dello strumento senza compromettere il comfort degli utenti.



(Progetto Fereo)

Parallelamente, la valutazione della QoE mostra giudizi generalmente favorevoli rispetto all'esperienza complessiva, alla comprensibilità delle attività proposte e al coinvolgimento generato dallo scenario immersivo. Nel complesso, tali risultati confermano che la soluzione in VR non solo risulta efficace dal punto di vista dell'apprendimento, ma soddisfa anche requisiti fondamentali di usabilità, comfort e qualità dell'esperienza, elementi essenziali per una sua possibile integrazione in contesti formativi reali.

4. CONCLUSIONI

Attraverso la realizzazione del progetto Fereo si è potuto porre l'attenzione su come la trasformazione digitale possa essere non soltanto un fattore abilitante, ma diventi un catalizzatore per ripensare in modo radicale i modelli di prevenzione in ambito SSL. In continuità con la visione di valorizzare la dinamicità e la variabilità dei sistemi sociotecnici, per supportare la gestione della SSL, il progetto supera l'approccio reattivo tipico della Safety-I allineandosi ai principi della Safety-II e della Resilience Engineering. Questo cambio di prospettiva ha guidato le attività di analisi organizzativa e la progettazione delle soluzioni formative, con l'obiettivo di comprendere e potenziare gli adattamenti quotidiani che permettono al lavoro di funzionare malgrado variabilità, incertezza e pressioni delle richieste operative.

L'integrazione tra il modello didattico ADDIE e il framework cognitivo Skill-Rule-Knowledge (SRK) di Rasmussen permette di strutturare un paradigma formativo capace di andare oltre la trasmissione di procedure, sostenendo lo sviluppo di competenze adattive. Tale integrazione si è rivelata essenziale per progettare strumenti formativi coerenti con la Safety-II: strumenti che non si limitano a prevenire l'errore, ma che allenano operatori e organizzazioni ad interpretare il contesto, riconoscere deviazioni, prendere decisioni informate e gestire la variabilità del lavoro reale.

Un ulteriore risultato risiede nella proposta di una soluzione formativa in Realtà Virtuale applicata alle procedure LOTO. La VR, concepita non come semplice replica di un ambiente reale ma come laboratorio controllato per esplorare scenari complessi, rende possibile simulare perturbazioni, condizioni inattese e alternative operative impossibili da riprodurre in aula o in campo. Questo permette di allenare competenze tipiche del livello Knowledge-based, centrali per la RE, quali il problem-solving in condizioni di incertezza e la gestione dell'imprevisto.

In parallelo allo sviluppo tecnologico, il progetto ha prodotto anche delle indicazioni operative sistematiche per la progettazione di soluzioni formative in VR, elaborate sulla base delle evidenze emerse da lavori sperimentali e ricerche teoriche presenti in letteratura. Le indicazioni operative coprono aspetti metodologici, tecnici e organizzativi, ad esempio, aiutando progettisti e formatori a definire in modo accurato i bisogni formativi, selezionando il livello di fedeltà necessario al contesto, pianificando la validazione delle soluzioni VR attraverso metriche multilivello che includano la verifica delle conoscenze apprese. Queste linee di indirizzo contribuiscono a consolidare un metodo replicabile per la progettazione di soluzioni immersive, riducendo la distanza tra applicazione tecnologica e necessità operative reali, un aspetto cruciale per la diffusione sostenibile della formazione avanzata in VR.

Sul piano metodologico, il protocollo sperimentale elaborato nel progetto rappresenta un ulteriore contributo. La valutazione multilivello – che confronta formazione tradizionale e formazione VR – permette di misurare non solo l'apprendimento procedurale, ma anche la capacità di adattamento, l'efficacia delle strategie decisionali e la gestione di scenari non completamente definiti. L'introduzione di

soluzioni alternative, deviazioni e situazioni anomale permette di osservare la mobilitazione delle conoscenze teoriche.

Nel complesso, il progetto propone un modello teorico ed operativo che arricchisce il panorama della formazione in SSL attraverso un approccio integrato: un solido impianto metodologico, un uso mirato delle tecnologie immersive e un processo di valutazione rigoroso.

Grazie a questa combinazione di visione teorica, strumenti digitali avanzati e validazione sperimentale, il progetto propone risultati replicabili e scalabili, utile sia alle imprese che intendono evolvere verso modelli di prevenzione proattivi, sia alla comunità scientifica che ricerca evidenze per consolidare l'applicazione dei principi Safety-II e RE nei contesti reali.

5. PRINCIPALI OUTPUT DEL PROGETTO

Ferrarotti A, Bernabei M, Colabianchi S et al. Virtual Reality-Based Approach to Occupational Health and Safety Training: Effects on Knowledge, Performance, and User Experience. *Computers & Education*. 2026 (in fase di revisione).

Sorrentino E, Stabile S, Bentivenga R et al. Digital transformation: organisational resilience for managing new emerging OSH risks. In *Book of abstracts 6th PEROSH Research Conference* (9 - 11 September 2025 Manchester UK). 2025.

Stabile S, Pietrafesa E, Bentivenga B et al. Virtual tour experience in OSH training: a case study for LOTO procedure. In *Book of abstracts. 6th PEROSH Research Conference* (9 - 11 September 2025 Manchester -UK). 2025.

Stabile S, Bentivenga R, Pietrafesa E et al. Assessing Resilience Practices in the Digital Transformation Era: A Storytelling-Based Cross-Sectional Study in Italy. *Applied Sciences* (2076-3417). 2025;15(11).

Stabile S, Bentivenga R, Sorrentino E et al. L'innovazione nella formazione in materia di salute e sicurezza sul lavoro: novità normative e applicazioni di VR. In: *Atti del 87° Congresso nazionale di medicina del lavoro - Società italiana di medicina del lavoro (Siml) Le tecnologie avanzate per la tutela e la promozione di salute e sicurezza nelle attività lavorative*. Bologna, 1 - 3 ottobre 2025.

Stabile S, Sorrentino E, Pietrafesa E et al. Progetto Fereo: analisi dei processi e dei modelli organizzativi aziendali interessati dalla trasformazione digitale. In: *Atti del 41° Congresso nazionale di igiene industriale e ambientale*. 2025;221-223.

Costantino F, Stabile S. Nuovi approcci per la formazione delle procedure Lockout/Tagout in manutenzione. *Manutenzione & Asset Management*. 2025;XXXII(4/5).

Stabile S, Pietrafesa E, Pietrafesa E et al. (2025). Innovative Systems for OSH training: VR Tour case study for LOTO procedure. *ICSI 2025 International Conference on Safety & Innovation*. 2025;180-189.

Bernabei M, Colabianchi S, Carli M et al. Enhancing occupational safety and health training: a guideline for virtual reality integration. *IEEE Access*. 2024;12:154349-64.

Sabetta S, Costantino F, Stabile S. A comparative analysis for automated information extraction from Osha Lockout/Tagout accident narratives with Large Language Model. In: *6th International Conference on Industry 4.0 and Smart Manufacturing, ISM 2024*. 2025.

Bentivenga R, Bernabei M, Carli M et al. Transforming Training with New Enabling Technologies: A Proposal to Verify the Efficacy of Virtual Reality Tools in the Occupational Health and Safety Sector. In: *International conference on WorldS4*. Singapore: Springer Nature Singapore. 2024;435-442.

Stabile S, Sorrentino E, Pietrafesa E et al. Trasformazione digitale: analisi dei rischi e strumenti di self assessment della resilienza organizzativa per la salute e sicurezza sul lavoro. In: Atti del 40° Congresso nazionale di igiene industriale e ambientale. Padova, 26 - 28 giugno 2024. 107-110.

Bentivenga R, Bernabei M, Carli M et al. Advancing Occupational Safety and Health Training: A Safety II Integration of the ADDIE Model for Virtual Reality. International Conference in Methodologies and intelligent Systems for Technology Enhanced Learning. Cham: Springer Nature Switzerland. 2024;313-324.

Laboratorio esperienziale Virtual tour training in salute e sicurezza sul lavoro. Fiera Maker Faire - XII edizione. Roma, 25 - 27 ottobre 2024.

Seminario Resilienza organizzativa e sostenibilità: proposta di virtual tour per la formazione alla salute e sicurezza sul lavoro. Fiera Ecomondo. Rimini, 8 novembre 2024.

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

- [1] Badri A, Boudreau-Trudel B, Souissi AS. Occupational health and safety in the industry 4.0 era: A cause for major concern? *Safety Science*. 2018;109:403–11.
- [2] Hollnagel E. Safety-I and Safety-II: the past and future of safety management. *Cognition Technology and Work*. 2015;17(3):461–4.
- [3] Dekker S, Hollnagel E, Woods D et al. Resilience Engineering : New directions for measuring and maintaining safety in complex systems. *Engineering, Environmental Science*. 2008.
- [4] Patriarca R, Bergström J, Di Gravio G et al. Resilience engineering: Current status of the research and future challenges. *Safety Science*. 2018;102:79–100.
- [5] Hollnagel E, Pariès J, Woods D et al. Resilience engineering in practice: A guidebook. 2011.
- [6] Woods DD. The theory of graceful extensibility: basic rules that govern adaptive systems. *Environment Systems and Decisions*. 2018;38(4):433–57.
- [7] Hollnagel E. Safety-II in practice: Developing the resilience potentials. Routledge; 2017.
- [8] Patriarca R, Falegnami A, Costantino F et al. WAX: An integrated conceptual framework for the analysis of cyber-socio-technical systems. *Safety Science*. 2021;136.
- [9] Hollnagel E, Woods DD, Leveson N. Resilience Engineering: Concepts and Precepts. *BMJ Quality & Safety*. 2006;15(6):447–8.
- [10] Ngongo PK, Almaktoof AMA, Kahn MTE. Practical Approach to Enhance Energy Resilience in Manufacturing Facilities. *Energy Science & Engineering* [Internet]. 2025;13(2):673–86. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/ese3.2021> [consultato maggio 2025].
- [11] Rasmussen J. Skills, rules, and knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* [Internet]. 1983;SMC-13(3):257–66. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6313160/> [consultato settembre 2024].
- [12] Bernabei M, Colabianchi S, Carli M et al. Enhancing Occupational Safety and Health Training: A Guideline for Virtual Reality Integration. *IEEE Access* [Internet]. 2024;12:154349–64. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10719987/> [consultato novembre 2024].
- [13] Lawson G, Shaw E, Roper T et al. Immersive virtual worlds: Multi-sensory virtual environments for health and safety training [Internet]. *arXiv*; 2019. URL: <http://arxiv.org/abs/1910.04697> [consultato dicembre 2025].
- [14] Stafford A, Brown Requist KW, Lotero Lopez S et al. Underground Mining Self-Escape and Mine Rescue Practices: an Overview of Current and Historical Trends. *Mining, Metallurgy and Exploration* [Internet]. 2023;40(6):2243–53. URL: <https://doi.org/10.1007/s42461-023-00863-6>.
- [15] Li X, Yi W, Chi HL, Wang X et al. A critical review of virtual and augmented reality (VR/AR) applications in construction safety. *Automation in Construction*. 2018.

- [16] Abbas JR, Chu MMH, Jeyarajah C et al. Virtual reality in simulation-based emergency skills training: A systematic review with a narrative synthesis. *Resuscitation Plus* [Internet]. 2023;16:100484. URL: <https://doi.org/10.1016/j.resplu.2023.100484>.
- [17] Boschè F, Abdel-Wahab M, Carozza L. Towards a Mixed Reality System for Construction Trade Training. *Journal of Computing in Civil Engineering* [Internet]. 2013;30(2). URL: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29CP.1943-5487.0000479> [consultato dicembre 2025].
- [18] Hollnagel E. RAG – Resilience Analysis Grid. *Resilience engineering in Practice: A guidebook*. 2011;275–95.
- [19] Adriaensen A, Bernabei M, Costantino F et al. Resilience Potentials for Health and Safety Management in Cobot Applications Using the Resilience Analysis Grid. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2023;145(10):1–17.
- [20] Ljungberg D, Lundh V. Resilience Engineering within ATM - Development, adaption, and application of the Resilience Analysis Grid (RAG). Final Report. 2014.
- [21] Boyce ME. Organizational story and storytelling: a critical review. In: *The Aesthetic Turn in Management*. Routledge; 2007.
- [22] Gray J. The power of storytelling: Using narrative in the healthcare context. 2009;2 (3):258–73.
- [23] McKnight PE, Najab J. Mann-Whitney U Test. In: *The Corsini Encyclopedia of Psychology*. [Internet]. John Wiley & Sons, Ltd; 2010;1-1. URL: <https://online-library.wiley.com/doi/abs/10.1002/9780470479216.corpsy0524> [consultato febbraio 2025].
- [24] Cazeri GT, De Santa-Eulalia LA, Serafim MP et al. Training for Industry 4.0: A systematic literature review and directions for future research. *Brazilian Journal of Operations and Production Management*. 2022;19(3):1–19.
- [25] Costantino F, Falegnami A, Fedele L et al. New and emerging hazards for health and safety within digitalized manufacturing systems. *Sustainability (Switzerland)*. 2021;13(19).
- [26] Farghaly K, Collinge W, Mosleh MH et al. Digital information technologies for prevention through design (PtD): a literature review and directions for future research. *Construction Innovation*. 2022;22(4):1036–58.
- [27] Instructional Design: The ADDIE Approach. [Internet]. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-0-387-09506-6> [consultato dicembre 2025].
- [28] Patriarca R. Resilience Engineering for Sociotechnical Safety Management. In: Ungar M, editor. *Multisystemic Resilience: Adaptation and Transformation in Contexts of Change*. [Internet]. Oxford University Press; 2021;0. URL: <https://doi.org/10.1093/oso/9780190095888.003.0025> [consultato dicembre 2025]
- [29] Cutchen SS. Safety-II-Resilience in the face of abnormal operation. *Process Safety Progress*. 2020;40(2).
- [30] Sujan MA, Huang H, Braithwaite J. Learning from incidents in health care: Critique from a Safety-II perspective. *Safety Science*. 2017;99(A):115–21.

- [31] Moher D, Liberati A, Tetzlaff J et al. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement. *Annals of Internal Medicine*. 2009;151(4):264–9.
- [32] Eu-Osha. Maintenance and occupational safety and health : a statistical picture. [Internet]. Publications Office of the European Union; 2010. URL: <https://data.europa.eu/doi/10.2802/30149> [consultato dicembre 2025].
- [33] Mastrullo KG, Kenneth G, Jones RA et al. The Electrical Safety Program Book. [Internet]. Jones & Bartlett Learning, LLC; 2006. URL: <https://www.abebooks.com/9780763743680/Electrical-Safety-Program-Book-Mastrullo-0763743682/plp> [consultato dicembre 2025].
- [34] Illankoon P, Manathunge Y, Tretten P et al. Lockout and Tagout in a Manufacturing Setting from a Situation Awareness Perspective. [Internet]. *Safety*. 2019;5(2):25. URL: Available from: <https://www.mdpi.com/2313-576X/5/2/25> [consultato dicembre 2025].
- [35] Unity [Internet]. Unity Real-Time Development Platform | 3D, 2D, VR & AR Engine. URL: <https://unity.com> [consultato dicembre 2025].
- [36] Meta – Shop AI glasses and VR headsets | Meta Store. [Internet]. URL: <https://www.meta.com/it/en/> [consultato dicembre 2025].
- [37] Lackner JR. Motion sickness: more than nausea and vomiting. *Exp Brain Res*. [Internet]. 2014;232(8):2493–510. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4112051/> 232(8):2493–510.
- [38] Perkis A, Timmerer C, Baraković S et al. QUALINET White Paper on Definitions of Immersive Media Experience (IMEx). [Internet]. arXiv; 2020 [cited 2025 Dec 23]. URL: <http://arxiv.org/abs/2007.07032> [consultato dicembre 2025].
- [39] Kourtesis P, Linnell J, Amir R et al. Cybersickness in Virtual Reality Questionnaire (CSQ-VR): A Validation and Comparison against SSQ and VRSQ. *Virtual Worlds*. [Internet]. 2023;2(1):16–35. URL: <https://www.mdpi.com/2813-2084/2/1/2> [consultato novembre 2024].
- [40] Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research. In: *Advances in Psychology*. [Internet]. North-Holland; 1988;139–83. URL: <https://www.sciencedirect.com:5037/science/chapter/bookseries/abs/pii/S0166411508623869> [consultato dicembre 2025].
- [41] Harms C, Biocca F. Internal Consistency and Reliability of the Networked Minds Measure of Social Presence. *Seventh Annual International Workshop: Presence 2004*. 2004.
- [42] Witmer BG, Singer MJ. Measuring Presence in Virtual Environments: A Presence Questionnaire. *Presence*. [Internet]. 1998;7(3):225–40. URL: <https://direct.mit.edu/pvar/article/7/3/225-240/92643> [consultato dicembre 2025].
- [43] Bangor A, Kortum PT, Miller JT. An Empirical Evaluation of the System Usability Scale. *International Journal of Human–Computer Interaction*. [Internet]. 2008;24(6):574–94. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10447310802205776> [consultato dicembre 2025].

ACRONIMI

ADDIE	Analysis, Design, Development, Implementation, Evaluation
CSQ – VR	Cybersickness Questionnaire – Virtual Reality
Eu-Osha	European Agency for Safety and Health at Work
FEREO	Formazione e Resilience Engineering organizzativa
LOTO	Lockout/Tagout
NASA – TLX	NASA Task Load Index
PQ	Presence Questionnaire
PRISMA	Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses
QoE	Quality of Experience
RAG	Resilience Analysis Grid
RE	Resilience Engineering
SRK	Skill Rule Knowledge
SUS	System Usability Scale
VR	Virtual Reality
WAD	Work As Done
WADI	Work As Disclosed
WAI	Work As Imagined
WAP	Work As Prescribed
WAx	Work As X

