

ESPOSIZIONE DEI LAVORATORI AL VIRTUALE E ALL'AUMENTATO

REALTÀ E TECNOLOGIE METAVERSE:

QUANTO SAPPIAMO?

1 Introduzione

Nel dinamico panorama della tecnologia sul posto di lavoro, l'UE sta assistendo a un cambiamento con l'avvento e la progressiva integrazione di nuove tecnologie di visualizzazione, realtà virtuale (VR), realtà aumentata (AR), realtà estesa (XR) e metaverso. Queste tecnologie sono sempre più utilizzate in una moltitudine di settori professionali. Originariamente limitate ad applicazioni specializzate come la simulazione di volo, queste tecnologie svolgono ora un ruolo significativo in una varietà di settori come la produzione, l'edilizia,

istruzione e assistenza sanitaria. In questi diversi ambiti, le tecnologie AR, VR, XR e metaverse sono destinate a modificare gli ambienti di lavoro e l'organizzazione del lavoro. Queste tecnologie sono attualmente utilizzate per diversi scopi nei luoghi di lavoro, tra cui la formazione, la visualizzazione dei dati e il lavoro da remoto. I recenti rapidi progressi nell'internet mobile, l'intelligenza artificiale (IA) sofisticata, l'aumento della potenza di calcolo e i display ad alta risoluzione hanno contribuito in modo determinante al rapido sviluppo di queste tecnologie (Angelov et al., 2020; Hamad & Jia, 2022; Hoyer et al., 2020; Rauschnabel et al., 2022).

L'uso pratico di AR e VR nella formazione e nella manutenzione, ad esempio, ne evidenzia i vantaggi. Il ruolo della AR nella formazione su macchinari complessi offre esperienze virtuali realistiche che migliorano l'apprendimento con feedback in tempo reale. Nella manutenzione, la AR fornisce una guida precisa, migliorando l'efficienza e la sicurezza.

Lacuna nella ricerca sull'uso di AR, VR e metaverso

Tuttavia, esiste una significativa lacuna nella ricerca sui rischi dell'adozione di AR e VR sul posto di lavoro, come il cybersick e le problematiche ergonomiche. Con la crescente integrazione di AR, VR, XR e tecnologie del metaverso nelle pratiche quotidiane sul posto di lavoro, si presentano le sfide e le opportunità associate per la SSL. Questo panorama in evoluzione richiede un approccio proattivo da parte di tutti gli stakeholder: decisori politici, ricercatori, leader del settore, progettisti tecnologici e SSL.

professionisti. Non devono solo stare al passo con i progressi tecnologici, ma anche anticipare e mitigare i rischi correlati in materia di SSL. È fondamentale comprendere appieno le implicazioni per la sicurezza e la salute sul lavoro (SSL) associate all'uso di queste tecnologie.

L'Agenzia europea per la sicurezza e la salute sul lavoro (EU-OSHA) ha già evidenziato i rischi per la salute e la sicurezza sul lavoro associati alla realtà virtuale e alla realtà aumentata (EU-OSHA, 2018, 2023a, 2023b). È stato riscontrato che tali rischi sono potenzialmente associati a una serie di effetti negativi per gli utenti (in questo caso, i lavoratori che utilizzano la tecnologia) (Lavoie et al., 2020; Somrak et al., 2019). In termini pratici, ciò significa che i lavoratori che utilizzano tecnologie di realtà virtuale e realtà aumentata potrebbero sperimentare effetti collaterali negativi (ad esempio, cybersickness, affaticamento degli occhi, sensazione di confusione, ecc.), che potrebbero avere un impatto sulla loro salute e sul loro benessere, nonché ostacolare le loro prestazioni lavorative (Oh & Son, 2022; Souchet et al., 2023a; Souchet et al., 2023b). I ricercatori sostengono che sia importante riconoscere e affrontare gli effetti collaterali delle moderne tecnologie visive sul posto di lavoro (Souchet et al., 2023a). Ciò è essenziale per lo sviluppo di standard e linee guida. Garantire la sicurezza e la salute sul lavoro dei lavoratori che utilizzano tecnologie di realtà aumentata, realtà virtuale, realtà aumentata e metaverso è fondamentale; tutte le parti interessate dovrebbero essere pienamente consapevoli dei potenziali benefici e rischi associati all'uso di queste tecnologie.

Ambito di applicazione dell'articolo

Questo articolo presenta una revisione completa della letteratura e la integra con interviste semi-strutturate con sette esperti selezionati che hanno lavorato o possiedono conoscenze nel campo della realtà virtuale, aumentata, della realtà aumentata e del metaverso, tra cui specialisti in materia di salute e sicurezza sul lavoro del settore, operatori e supervisor del settore con esperienza diretta, esperti di sicurezza nazionali e internazionali, rappresentanti di gruppi di interesse e stakeholder industriali. Ulteriori informazioni sul metodo applicato in questo studio e sugli intervistati sono disponibili nell'allegato.

Questa prima sezione dell'articolo introduce le basi per la discussione successiva. La seconda sezione esplora terminologie e concetti, fornendo spiegazioni approfondite per garantire chiarezza e comprensione. La terza sezione esamina le attuali applicazioni e opportunità di AR, VR e XR. e tecnologie metaverse nell'ambito della SSL. La quarta sezione affronta i rischi per la SSL e gli impatti sulla sicurezza e la salute dei lavoratori associati a queste tecnologie, basandosi sui risultati delle revisioni della letteratura e delle interviste condotte nell'ambito di questo studio. La quinta e ultima sezione discute i principali risultati, presentando raccomandazioni per l'adozione di tecnologie metaverse negli ambienti di lavoro e identificando lacune ed esigenze per la ricerca e le politiche future.

2 Concetti e terminologia

Una revisione dei concetti e delle terminologie relative a VR, AR, XR e metaverso rivela l'uso eterogeneo e incoerente di diversi termini per descrivere gli stessi tipi di hardware e applicazioni (Laato et al., 2024). Ciò crea confusione per studiosi ed esperti che si orientano tra i documenti pubblicati. letteratura, poiché non è immediatamente evidente a quale tipo di tecnologia ci si riferisce in un dato contesto.

Di recente sono stati compiuti sforzi per standardizzare la terminologia. In questo articolo, **la realtà virtuale è definita come un'esperienza immersiva in uno spazio tridimensionale visivamente isolato**, senza un'interazione significativa dell'utente con il mondo fisico esterno alla simulazione (Rauschnabel et al., 2022).

D'altro canto, **la realtà aumentata è definita come un'esperienza che integra elementi virtuali nello spazio fisico dell'utente**, con diversi gradi di integrazione degli elementi virtuali nello spazio fisico (Rauschnabel et al., 2022).

Questo articolo prende in prestito termini e definizioni proposti dal recente sviluppo del framework xReality1 (XR) (Rauschnabel et al., 2022). Questo framework concepisce la XR come un concetto onnicomprensivo che include sia la realtà virtuale che quella aumentata, e include anche tutte le altre terminologie utilizzate in letteratura per riferirsi in generale alle tecnologie VR e AR, come le tecnologie visive immersive (IVT). (Grassini & Laumann, 2021), realtà digitale (DR) (Haleem et al., 2022), ambienti virtuali (Ellis, 1994), realtà incrociata (Ziker et al., 2021), mondi virtuali (Hew & Cheung, 2010) e realtà generata dai media (Laato et al., 2024). 2 Nel presente articolo, il termine XR include generalmente tecnologie che utilizzano display montati sulla testa (HMD); nell'ambito del framework XR, **XR è utilizzato come termine generico per indicare sia le tecnologie VR che AR.** 3

Figura 1: Esempio di visore VR montato sulla testa



¹ Alcuni autori usano lo stesso acronimo per il termine "realtà estesa" o "espansa", riferendosi a un concetto simile. Si veda Dwivedi et al. (2020) e Chuah (2018).

² Nella letteratura scientifica, tutte queste terminologie vengono utilizzate anche per riferirsi a tecnologie che non utilizzano display montati sulla testa (HMD): esempi sono il Cave Automatic Virtual Environment (CAVE) (Manjrekar et al., 2014) e i grandi display (Tan et al., 2003).

³ Vale la pena ricordare che gli studiosi usano spesso anche il termine "realtà mista" (MR). Questo termine descrive l'integrazione di elementi virtuali e fisici (Farshid et al., 2018, Flavián et al. 2019); è anche un termine generico che include tutte le tecnologie precedentemente discusse (Skarbez et al., 2021). Per evitare ambiguità, il termine MR non verrà utilizzato nel presente articolo.

Figura 2: Esempio di display AR montato sulla testa



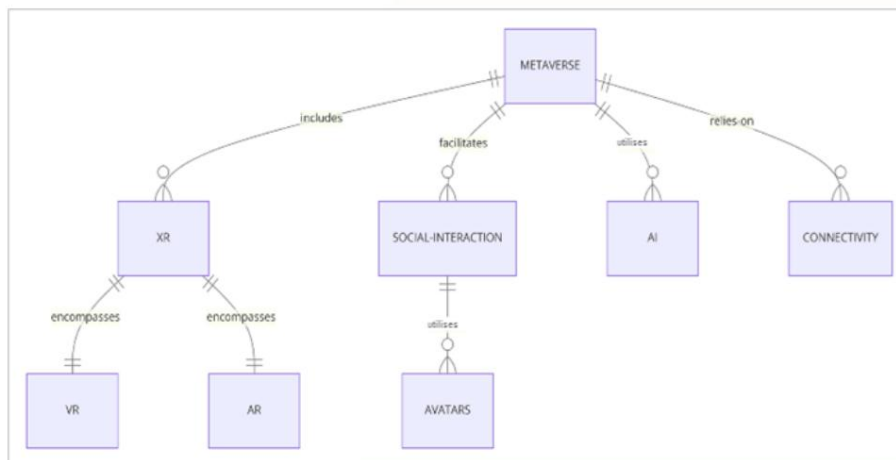
Originario del romanzo "Snow Crash" di Neal Stephenson del 1992 (Stephenson, 1992), il termine "metaverso" si è evoluto per descrivere una futura iterazione di Internet e delle esperienze virtuali. Oggi, in alcuni dibattiti teorici, il metaverso è visto come la potenziale evoluzione delle attuali tecnologie Internet e XR (R. Cheng et al., 2022).

Si ipotizza che possa superare i framework XR grazie alla forte incorporazione di altre tecnologie, integrando elementi di connettività, intelligenza artificiale e altre innovazioni per creare ambienti immersivi e interattivi come la blockchain (un registro digitale sicuro e decentralizzato per la registrazione delle transazioni), si crea così un intricato universo virtuale in cui le persone possono svolgere tutte le attività che oggi vengono generalmente svolte di persona (Bale et al., 2022). Ciò è particolarmente pertinente quando la connettività, la futura integrazione con l'intelligenza artificiale, la possibilità di interagire con gemelli digitali (una replica virtuale di un oggetto, processo o sistema fisico, utilizzata per simulazione, analisi e controllo) o l'uso di avatar rappresentano un punto focale dell'utilizzo della realtà virtuale (De Felice et al., 2023).

Si distingue per la sua architettura orientata ai servizi che enfatizza l'interazione sociale e i contenuti generati dagli utenti, divergendo da quella che spesso è stata definita l'essenza incentrata sulla tecnologia dell'XR. tecnologie (Dwivedi et al., 2023; Hussain et al., 2023; Zhu et al., 2023). Tuttavia, definire il metaverso in modo esaustivo è difficile. Essendo un panorama digitale in rapida evoluzione, sfugge a definizioni statiche. Alcuni ricercatori (Dolata & Schwabe, 2023) hanno descritto il metaverso come un "bersaglio mobile" e una parola d'ordine, sottolineandone la natura sfuggente e l'elevata flessibilità interpretativa.

Per chiarezza, il presente articolo **si riferirà al metaverso come all'integrazione delle tecnologie XR con connettività e intelligenza artificiale, con particolare attenzione all'interazione sociale tra gli utenti**; utilizzerà **XR come termine generale che comprende AR e VR**. Un diagramma esplicativo è presentato nella Figura 3. Poiché il metaverso è generalmente descritto come uno spazio costituito da tecnologie XR, tutti i contenuti relativi a I potenziali rischi e impatti della XR sulla sicurezza e la salute dei lavoratori si applicano anche al concetto più ampio di metaverso.

Figura 3: La relazione tra le varie tecnologie discusse in questo documento



Fonte: elaborazione dell'autore.

L'uso di HMD (head-mounted display)

Gli utenti delle tecnologie XR (e, per estensione, del metaverso) indossano prevalentemente HMD. Questo L'apparecchiatura assomiglia a grandi occhiali che gli utenti indossano per ricevere immagini vicino ai loro occhi. Nell'ultimo decennio, gli HMD hanno subito un processo di miniaturizzazione e aumento di potenza. Mentre gli HMD di prima generazione erano ingombranti e necessitavano di una connessione fisica a un computer tramite un cavo per trasmettere le immagini agli occhiali, le tecnologie più recenti sono autonome (ovvero non necessitano necessariamente di una connessione fisica via cavo a un computer) e sono generalmente meno ingombranti, più leggere (o con un migliore bilanciamento del peso) e più ergonomiche rispetto ai loro predecessori (Fang et al., 2023; Greenwald, 2023; Lang, 2017; Truly, 2023). In alcuni casi, gli HMD sono diventati più pesanti con le nuove iterazioni tecnologiche, come nel caso di alcuni prodotti Meta/Oculus (vedere Bérastégui (2024)). Tuttavia, vale la pena notare che questi HMD più recenti presentano anche un'ergonomia migliorata e un migliore bilanciamento del peso (oltre a specifiche tecniche più elevate) che potrebbero compensare l'aumento di peso.

I miglioramenti ergonomici nei recenti HMD includono cinghie regolabili e imbottiture sagomate, che garantiscono una vestibilità più confortevole per un'ampia gamma di dimensioni e forme della testa. Inoltre, i progressi nella distribuzione del peso contribuiscono a ridurre la tensione su collo e spalle, migliorando il comfort dell'utente durante l'uso prolungato. Infine, la risoluzione dello schermo e la frequenza di aggiornamento sono aumentate, rendendo l'esperienza complessivamente più immersiva e piacevole. Gli HMD includono comunemente un'unità di elaborazione in grado di elaborare le informazioni e una batteria o cavi per l'alimentazione.

La realtà virtuale moderna impiega i visori HMD quasi universalmente. Allo stesso modo, anche i dispositivi di realtà aumentata ampiamente utilizzati rientrano nella categoria degli HMD. Tuttavia, la realtà aumentata può essere sperimentata attraverso metodi alternativi: le fotocamere degli smartphone possono interagire con ambienti reali per aumentarli digitalmente, e gli schermi trasparenti possono sovrapporre informazioni digitali all'ambiente fisico, offrendo un'ulteriore possibilità di interazione con la realtà aumentata.

3 opportunità di SSL nelle tecnologie XR e metaverso: un panoramica

Tecnologia VR: formazione, salute e sicurezza

Nel corso degli anni, la tecnologia VR si è affermata come uno strumento importante nei programmi di formazione in numerosi settori, in particolare in settori come l'edilizia, l'industria mineraria e l'energia. Questi settori, spesso caratterizzati dalla necessità di condurre la formazione in ambienti potenzialmente pericolosi, hanno adottato la tecnologia VR fin da subito per migliorare sia la sicurezza che l'efficienza delle loro metodologie di formazione (Grassini & Laumann, 2020b). La letteratura attuale sull'argomento rivela che la tecnologia VR è fondamentale per facilitare la formazione pratica e le simulazioni in un'ampia gamma di settori.

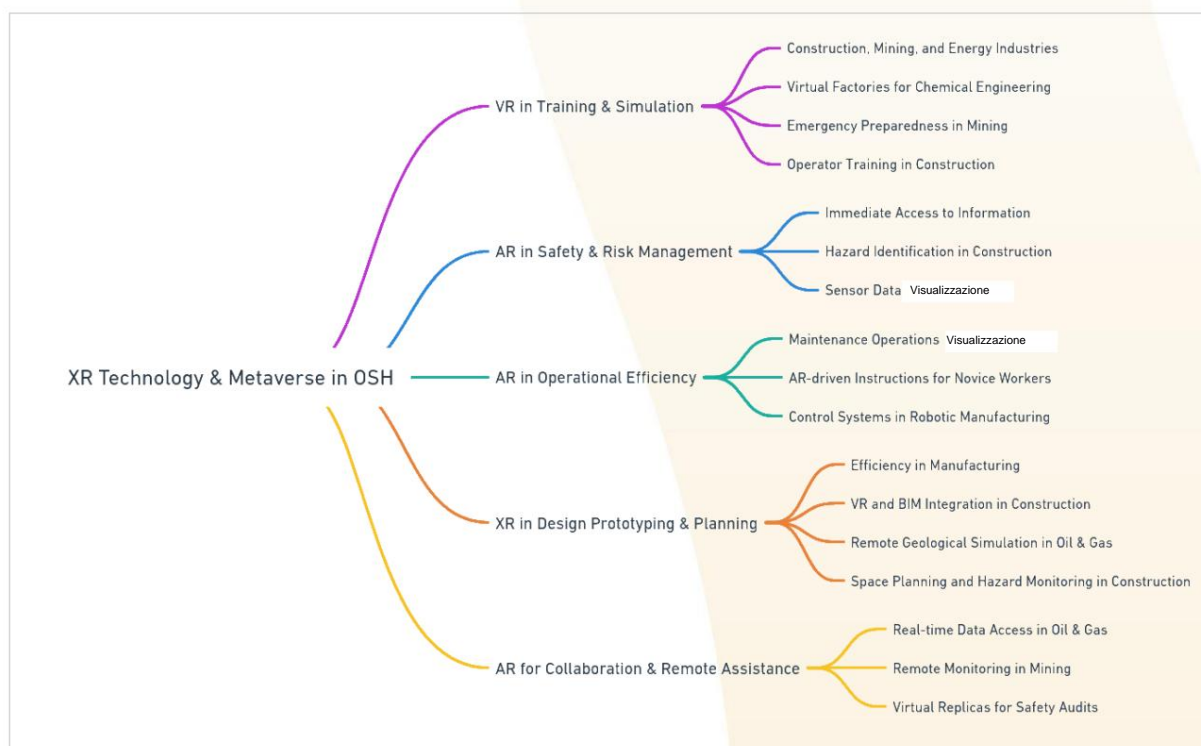
Ad esempio, alcuni studi hanno evidenziato il ruolo fondamentale della realtà virtuale nella creazione di fabbriche virtuali nei settori dell'ingegneria chimica e biochimica, consentendo la simulazione sicura di processi industriali complessi. (vedi ad esempio, Luo et al. (2015)). Altri studi hanno dimostrato l'efficacia della VR nell'estrazione mineraria

settore, in particolare nel migliorare la preparazione alle emergenze e la versatilità operativa tra i minatori di carbone sotterranei (Grabowski e Jankowski, 2015). Inoltre, il settore edile trae vantaggio dalla realtà virtuale per migliorare la formazione degli operatori (Babalola et al., 2023). Queste evidenze sottolineano il ruolo fondamentale della realtà virtuale nel progresso dei modelli di formazione, offrendo un'alternativa sicura ed efficiente ai metodi di formazione tradizionali.

AR e metaverso: oltre la formazione e l'uso per la salute e la sicurezza.

L'applicazione dell'AR e del metaverso in generale si è ormai estesa oltre la formazione; include altri usi come la progettazione di luoghi di lavoro e operazioni da remoto (ad esempio, l'assistenza remota degli operatori). Queste tecnologie offrono anche potenziale per le pratiche di SSL: ad esempio, facilitando l'accesso dei lavoratori a informazioni virtuali immersive in tempo reale necessarie per lavorare in sicurezza; e migliorando il modo in cui valutano e affrontano i rischi di SSL con il supporto di una sovrapposizione di informazioni generate dall'intelligenza artificiale. Possono anche fornire una piattaforma in cui i lavoratori interagiscono all'interno di un ambiente virtuale 3D completamente immersivo, replicando scenari del mondo reale (gemelli digitali),⁴ ma senza i rischi di SSL associati agli ambienti di lavoro reali. Grazie ai gemelli digitali, i lavoratori possono mettere in pratica e affinare le proprie competenze, imparare dagli errori, senza temere conseguenze reali come incidenti e rischi per la salute e la sicurezza sul lavoro.

Figura 4: Principali usi relativi alla SSL e attuali opportunità offerte dalle tecnologie XR e metaverso



Fonte: elaborazione dell'autore.

La tecnologia AR si è dimostrata cruciale per migliorare la sicurezza e la gestione dei rischi, grazie all'accesso immediato a informazioni vitali durante le emergenze, che favorisce un rapido processo decisionale e la prevenzione degli incidenti. Nell'industria chimica, l'integrazione della AR con piattaforme di digital twin è fondamentale per creare ambienti simulati per la formazione e la verifica delle procedure di sicurezza (Büchner et al., 2022). Ha evidenziato come l'applicazione delle tecnologie XR nel settore edile possa contribuire all'identificazione dei pericoli nei cantieri, alla valutazione dei rischi e alla gestione della sicurezza, confermando il ruolo della XR nel migliorare le prestazioni di sicurezza e la consapevolezza dei lavoratori in materia di sicurezza (Babalola et al., 2023). Le tecnologie XR sono state utilizzate anche per elaborare e visualizzare le informazioni dei sensori, aumentando così la sicurezza, e questo si è rivelato importante in settori industriali come l'edilizia (Salinas et al., 2022).

⁴ Repliche virtuali di entità, sistemi o processi fisici, progettate per simulare, monitorare e analizzare le loro controparti reali in tempo reale, consentendo l'ottimizzazione, la previsione e un migliore processo decisionale.

Tecnologia AR: utilizzo per aumentare l'efficienza operativa e facilitare le operazioni di manutenzione

La tecnologia AR è stata utilizzata per aumentare l'efficienza operativa e supportare le operazioni di manutenzione in diversi settori (Palmarini et al., 2018). La tecnologia AR è stata identificata come una risorsa in particolare nella manutenzione delle apparecchiature industriali, riducendo significativamente il tempo necessario per cercare ed elaborare diverse informazioni durante le attività di manutenzione, con un impatto sulla sicurezza degli operatori (Koteleva et al., 2020, 2021). Van Lopik et al. (2020) riconoscono l'impatto positivo della AR non solo per le industrie, ma anche per le piccole imprese, migliorando le operazioni di manutenzione e offrendo vantaggi economici, garantendo al contempo la sicurezza. Innovazioni come il Mobile Augmented Reality Maintenance Assistant (MARMA) 5 sono fondamentali per migliorare la SSL (Konstantinidis et al., 2020), ad esempio guidando i lavoratori inesperti attraverso complesse operazioni di manutenzione con istruzioni basate sulla realtà aumentata e l'identificazione delle risorse tramite telecamera, riducendo così significativamente il rischio di incidenti e migliorando i protocolli di sicurezza. Nella gestione della produzione robotica, la realtà aumentata è essenziale per creare sistemi di controllo efficienti e intuitivi (Caiza et al., 2020), riducendo i potenziali rischi per gli utenti. Inoltre, l'utilizzo della realtà aumentata nella presentazione di istruzioni di produzione assistita da computer (CAM)⁶⁷ è fondamentale per garantire la sicurezza dei lavoratori e l'efficienza operativa, grazie alla fornitura di chiare linee guida operative (Mourtzis et al., 2018).

Tecnologia XR - per facilitare la prototipazione del design

L'uso delle tecnologie XR è stato proposto per facilitare la prototipazione del design nella produzione industria (Bottani & Vignali, 2019), aumentando l'efficienza e riducendo i rischi per gli operatori. La combinazione della realtà virtuale con il Building Information Modeling (BIM)⁸ nel settore delle costruzioni ne evidenzia l'utilità in contesti come la progettazione e la pianificazione (Johansson & Roupé, 2024). Chen et al. (2022) descrivono in dettaglio come la realtà virtuale, se integrata con il BIM, migliori il processo decisionale, la qualità del lavoro e la produttività, facilitando al contempo l'identificazione precoce dei pericoli durante la fase di progettazione.

Riquadro 1: Esempio di tecnologie XR utilizzate per la gestione della SSL nel settore edile

Uno studio recente (Babalola et al., 2023) sul settore edile ha rilevato che le tecnologie XR sono state utilizzate con successo in questo settore per la prevenzione e la gestione dei rischi di SSL, tra cui formazione, identificazione e visualizzazione dei pericoli, valutazione dei rischi e progettazione per la sicurezza. Le tecnologie XR si sono rivelate importanti per diversi fattori chiave che influenzano la sicurezza nei cantieri edili (Rivera et al., 2024), tra cui fattori generali (ad esempio norme e regolamenti, sicurezza, organizzazione, cultura e clima), fattori relativi a materiali e attrezzature, fattori del sito e fattori umani (ad esempio motivazione, competenza, pressione lavorativa, comportamento e comunicazione dei lavoratori).

La formazione sulla sicurezza basata sulla realtà virtuale nel settore edile suggerisce che la realtà virtuale può migliorare efficacemente le prestazioni di sicurezza, riducendo potenzialmente gli incidenti e migliorando la consapevolezza della sicurezza dei lavoratori (Chellappa et al., 2022). Se combinata con il BIM, un processo digitale per la generazione e la gestione. Grazie alle informazioni sullo sviluppo di un edificio durante il suo ciclo di vita, la realtà virtuale migliora il processo decisionale, portando a una qualità del lavoro superiore, a un aumento della produttività e a una sostanziale riduzione dei costi, e prevenendo i rischi per la salute e la sicurezza sul lavoro (SSL) supportando decisioni informate (Chen et al., 2022). Il potenziale della realtà virtuale nella visualizzazione della progettazione edilizia e nella transizione dalla tradizionale progettazione assistita da computer ai modelli immersivi contribuisce in modo significativo all'identificazione dei pericoli e alla pianificazione per processi di costruzione più sicuri (Whyte et al., 2000). Dal punto di vista della SSL, il metaverso può offrire strumenti di pianificazione più sicuri ed efficienti, riducendo il rischio di errori di pianificazione e di comunicazione, e migliorando i protocolli di sicurezza negli ambienti di costruzione.

L'uso della VR e della AR in diversi settori

Nel settore petrolifero e del gas, la capacità della realtà virtuale di simulare aree geologiche per l'esplorazione remota riduce al minimo la necessità di trivellazioni in loco, riducendo così l'esposizione dei lavoratori ad ambienti pericolosi (Jampeisov,

⁵ Uno strumento che utilizza la realtà aumentata per fornire indicazioni e informazioni visive in tempo reale per agevolare le attività di manutenzione, migliorando l'efficienza e la precisione.

⁶ Si riferisce all'uso di software e macchinari controllati da computer per automatizzare i processi di produzione, tra cui la pianificazione, la gestione e l'esecuzione delle attività di produzione.

⁷ Ad esempio, nella piegatura CNC (un processo di produzione in cui vengono utilizzate macchine controllate da computer per piegare lamiere di metallo o altri materiali in forme e angoli specifici con elevata precisione ed efficienza).

⁸ Un processo di rappresentazione digitale che integra le caratteristiche fisiche e funzionali delle strutture edilizie, consentendo alle parti interessate di gestire in modo efficiente le informazioni durante l'intero ciclo di vita di un edificio.

2019). Inoltre, le tecnologie XR sono state utilizzate nel settore delle costruzioni per favorire una gestione sicura ed efficace delle costruzioni, tra cui la pianificazione degli spazi, il monitoraggio dell'ambiente del sito e previsione di possibili pericoli per ridurre al minimo i rischi prima e durante i processi di costruzione (Zhao et al., 2023).

La tecnologia AR può essere utilizzata per migliorare la collaborazione e facilitare l'assistenza remota degli operatori (Lukosch et al., 2015). In alcuni settori industriali, come quello petrolifero e del gas, i dispositivi indossabili di realtà aumentata sono stati utilizzati per fornire accesso ai dati in tempo reale sulle operazioni nei cantieri, migliorando così la sicurezza in condizioni difficili (H. Cheng et al., 2022). Nel settore minerario, la realtà aumentata consente il monitoraggio remoto tramite sistemi di comando-controllo, integrandosi con i dati dei sensori ambientali in tempo reale per fornire soluzioni di sicurezza, in particolare durante le emergenze (Buddhan et al., 2019). La realtà aumentata (XR) è stata utilizzata per il monitoraggio remoto e la risposta agli incidenti in tempo reale, fornendo ai professionisti e ai responsabili della SSL strumenti per gestire la SSL in modo proattivo. Ad esempio, le repliche virtuali degli spazi di lavoro fisici nel metaverso possono consentire ispezioni e audit di sicurezza da remoto, riducendo la necessità di una presenza fisica in ambienti pericolosi. (Al-Gnbri, 2022; Wang et al., 2022).

Riquadro 2: Come la tecnologia XR avvantaggia la SSL nel settore minerario ed estrattivo: esempio

Il ruolo della realtà virtuale nel migliorare la consapevolezza della sicurezza dei lavoratori è fondamentale nel settore minerario, un settore soggetto a rischi per la salute e la sicurezza sul lavoro, sebbene il pieno potenziale della tecnologia nella gestione della sicurezza dei lavoratori non sia ancora pienamente sfruttato (Duarte et al., 2019). La realtà virtuale viene utilizzata nella formazione completa dei minatori di carbone sotterranei, migliorando la loro preparazione per diversi scenari minerari ed emergenze (Grabowski & Jankowski, 2015). Inoltre, la realtà virtuale viene utilizzata per visualizzare informazioni complesse per affrontare la sicurezza dei siti minerari, gli effetti ambientali e la manutenzione dei macchinari (Duarte et al., 2021).

L'introduzione di sistemi di formazione basati sulla realtà virtuale ha superato i metodi tradizionali, offrendo un'esperienza di apprendimento più efficace e immersiva. I tirocinanti addetti alle operazioni minerarie trovano la formazione basata sulla realtà virtuale più immersiva, intuitiva, interattiva e facile da usare rispetto ai tradizionali sistemi basati su schermo (Zhang, 2017). La realtà virtuale svolge anche un ruolo chiave nella simulazione di ambienti minerari dinamici e tridimensionali per scopi come la progettazione virtuale (Strzajkowski et al., 2024), in un processo che può migliorare la sicurezza degli ambienti di lavoro minerari. L'uso della realtà virtuale nella modellazione delle sfide ergonomiche relative alle attrezzature minerarie potrebbe contribuire alla progettazione di macchinari più sicuri (Foster & Burton, 2004).

La realtà aumentata può anche migliorare la sicurezza dei lavoratori nel settore minerario, grazie a sistemi di controllo e comando a distanza che combinano la realtà aumentata con dati di sensori ambientali in tempo reale, offrendo soluzioni per la sicurezza dei lavoratori, in particolare in caso di emergenza (Buddhan et al., 2019). La realtà aumentata è stata integrata con tecnologie come l'identificazione a radiofrequenza (RFID) per una gestione efficace dei processi di produzione mineraria, inclusa l'identificazione e la localizzazione di oggetti in movimento (Vladimir et al., 2014), che è significativa per prevenire collisioni con i lavoratori. Le interfacce di realtà aumentata indossabili aiutano nell'ispezione dei nastri trasportatori nel settore minerario, supportando i piloti di droni nel migliorare la sicurezza e l'efficienza dei lavoratori (Keller et al., 2018). La realtà aumentata, insieme ad altre tecnologie di rilevamento, sta supportando le operazioni minerarie utilizzando la visualizzazione 3D e nodi di sensori autonomi dal punto di vista energetico per la localizzazione, la mappatura, la manutenzione e la sicurezza (Kiziroglou et al., 2017).

Il ruolo della realtà aumentata nell'Ergonomia 4.0 nell'ambito dell'Industria 4.0 include l'integrazione dei fattori umani e dell'ergonomia nelle operazioni minerarie per aumentare la sicurezza dei lavoratori e l'efficienza operativa (Paul e Briceno, 2021).

Infine, l'integrazione di AR e VR nell'istruzione mineraria è esemplificata da progetti come Mixed Reality Handbooks for Mining Education (MiReBooks), che sta sviluppando manuali minerari interattivi basati su AR e VR per strumenti didattici immersivi, simulando ambienti altrimenti inaccessibili o pericolosi (Daling et al., 2020).

4 XR e metaverso sul posto di lavoro: rischi per la salute e la sicurezza sul lavoro e risultati in materia di sicurezza e salute dei lavoratori

Nel contesto delle tecnologie XR e del metaverso, la realtà virtuale si distingue come quella più studiata.

La realtà virtuale è stata utilizzata in contesti professionali in modo più esteso rispetto alla realtà aumentata e al metaverso, motivo per cui le implicazioni del suo utilizzo in termini di SSL sono state considerate in modo più completo. La maggior parte della letteratura su

Le implicazioni in termini di SSL dell'uso della realtà virtuale sul lavoro si concentrano sulle problematiche ergonomiche associate all'hardware che facilita le esperienze di realtà virtuale. Come accennato in precedenza (vedere Capitolo 2), questo consiste in un HMD.

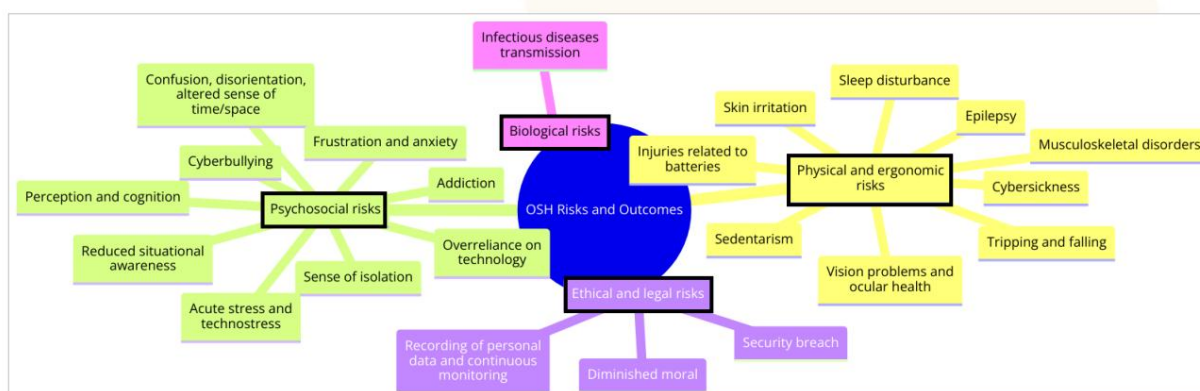
indossati dai lavoratori vicino agli occhi e comunemente legati alla testa e/o al collo tramite fascette. Recenti ricerche hanno evidenziato diversi rischi per la salute e la sicurezza sul lavoro associati all'uso della realtà virtuale sul posto di lavoro (Souchet et al., 2023a). Nonostante gli effetti negativi a breve termine della realtà virtuale siano stati documentati nella letteratura scientifica, permane una netta carenza di studi scientifici approfonditi sugli effetti collaterali a medio e lungo termine dell'uso prolungato della tecnologia VR.

In questa sezione vengono presentati altri rischi per la SSL, in particolare quelli relativi agli aspetti psicosociali associati all'uso della tecnologia VR e alla salute mentale e al benessere dei lavoratori, generalmente meno rappresentati nella letteratura scientifica. Questi rischi sono stati identificati nella letteratura pertinente e la loro descrizione è stata integrata dalle informazioni raccolte attraverso le interviste agli esperti.

Le categorie di rischio SSL discusse di seguito sono interconnesse e non devono essere analizzate separatamente (ad esempio, fattori fisici ed ergonomici, nonché preoccupazioni relative alla privacy, possono influire anche sui rischi psicosociali).

La Figura 5 illustra i rischi per la salute e la sicurezza sul lavoro e le conseguenze per la salute correlate all'uso delle tecnologie XR e metaverse sul posto di lavoro.

Figura 5: Rischi per la salute e la sicurezza sul lavoro e conseguenze per la salute correlati all'uso delle tecnologie XR e metaverse sul posto di lavoro



Fonte: elaborazione dell'autore.

I rischi nella Figura 5 riguardano quattro aree:

• **I rischi fisici ed ergonomici** sono legati all'ergonomia dell'HMD (peso, fattore di forma, indossabilità), all'emissione di luce blu vicino agli occhi, alla ridotta necessità di movimento fisico durante le operazioni XR e al potenziale malfunzionamento della tecnologia. Inoltre, la cybersickness può essere causata da una combinazione di fattori fisici ed ergonomici degli HMD.

• **I rischi psicosociali** sono legati al potenziale di queste tecnologie di causare stress dovuto alla necessità di apprendere nuove competenze e interagire con nuove apparecchiature, alla riduzione delle interazioni fisiche e con i coetanei, nonché all'isolamento e ai rischi legati all'interazione con e tra avatar. Questi includono anche sovraccarico sensoriale o cognitivo, difficoltà a distinguere tra ambienti virtuali e reali che porta a disorientamento e impatti sulle funzioni cognitive (attenzione, memoria, consapevolezza spaziale).

• **I rischi etico-legali** sono legati alla natura nuova e non regolamentata della tecnologia, alle implicazioni etiche delle interazioni digitali e alle caratteristiche tecniche della tecnologia che le rendono soggette a violazioni della privacy.

• **I rischi biologici** sono legati alla potenziale contaminazione da agenti patogeni dell'attrezzatura indossata dall'utente.

4.1 Rischi e conseguenze per la salute in materia di SSL correlati a fattori fisici ed ergonomici

Le tecnologie XR e metaverse introducono diversi rischi fisici in materia di salute e sicurezza sul lavoro (SSL) derivanti dalla progettazione e dall'utilizzo dell'hardware necessario per consentire l'esperienza XR. Tali rischi sono analizzati in questo capitolo.

Tra le principali preoccupazioni rientrano le sfide ergonomiche poste dalla forma, dalla vestibilità e dal peso degli HMD, che possono causare disagio, tensione al collo e problemi muscoloscheletrici. Inoltre, la vicinanza degli schermi agli occhi degli utenti aumenta il rischio di affaticamento visivo dovuto alla necessità per gli occhi di adattarsi costantemente alle diverse distanze percepite all'interno dell'ambiente virtuale.

Malattia informatica

La cybersickness⁹ ha un impatto negativo notevole sulla salute dei lavoratori che utilizzano la tecnologia VR sia in ambito personale che professionale, ed è stata ampiamente studiata fin dai primi anni '90 (Kennedy et al., 1993). Questo fenomeno è tra i più studiati nel contesto degli effetti collaterali dell'uso di HMD ed è stato spesso un fattore significativo che ha ostacolato l'adozione diffusa di queste tecnologie (Garrido et al., 2021). Si ritiene che questo fenomeno, che assomiglia alla cinetosi¹⁰, si verifichi a causa di

conflitto sensoriale sperimentato dagli utenti, in cui le informazioni ricevute dal sistema vestibolare sono in contrasto con la percezione visiva, con sintomi simili alla cinetosi e alla cinetosi identificate in ricerche precedenti: affaticamento degli occhi, mal di testa, nausea e disorientamento (Reason & Brand 1975).

Altri approcci teorici ipotizzano che l'instabilità posturale degli utenti causi il mal di computer (Stoffregen & Smart, 1998).

Nonostante l'ottimismo iniziale per il superamento di questo problema con l'avvento degli HMD (Biocca, 1992), il disagio durante le sessioni di realtà virtuale rimane una preoccupazione significativa. Alcuni risultati mostrano che circa un terzo degli utenti generali di realtà virtuale sperimenta disagio, con il 5% che segnala sintomi gravi e, in alcuni contesti, tra l'80% e il 95% degli utenti ne è affetto (Kim et al., 2005; Stanney et al., 2020; Stanney et al., 2021). Secondo Bérastégui (2024), sintomi come una sensazione di instabilità o di ubriachezza che peggiora con il movimento della testa (simile ai sintomi dell'atassia posturale) possono persistere per diversi giorni dopo l'esposizione. Sebbene gli HMD moderni siano migliorati, riducendo alcuni fattori di rischio, il cybersickness non è stato sradicato (Caserman et al., 2021; Gallagher & Ferrè, 2018).

L'effetto collaterale del cybersickness è stato evidenziato in tutte le interviste condotte nell'ambito di questo studio.

Uno degli intervistati (Intervista 1) ha riferito che il cybersickness è uno dei fattori per i quali aziende e organizzazioni chiedono consulenza e che potenzialmente ostacola principalmente l'adozione delle tecnologie VR. È dimostrato che gli impatti negativi delle tecnologie XR si accumulano con l'uso nel corso della settimana, in particolare nel caso della nausea; ciò solleva preoccupazioni circa il loro utilizzo prolungato in contesti lavorativi (Bérastégui, 2024). Nelle impostazioni VR che simulano ambienti d'ufficio e in cui il movimento degli utenti è minimo, il cybersickness è meno diffuso rispetto ad altri contesti (Filho et al., 2018; Filho et al., 2019a).

Tuttavia, la nostra comprensione del cybersickness è incompleta e sono necessari ulteriori approfondimenti (Tian et al., 2022). La ricerca esamina principalmente i conflitti tra input propriocettivi (inclusa la percezione del movimento di sé e della posizione del corpo nello spazio), visivi e vestibolari, con alcuni studi che indagano problematiche visive come il conflitto tra vergenza e accomodamento sperimentato durante l'elaborazione di immagini 3D in realtà virtuale (Chang et al., 2020; Descheneaux et al., 2020; Fuchs, 2017; Koohestani et al., 2019).

In effetti, le attuali teorie sul mal di computer rimangono oggetto di dibattito scientifico. Gli studi hanno rivelato differenze di genere nel mal di computer, con le donne che ne manifestano i sintomi più frequentemente, una disparità che potrebbe essere correlata al design ergonomico degli HMD o alla suscettibilità intrinseca alla cinetosi, sebbene questo risultato sia controverso (Grassini & Laumann 2020a). L'influenza del tipo di simulazione VR, del tempo di esposizione (Thorp et al., 2022) e delle caratteristiche hardware come la latenza dello schermo sono riconosciuti ma non pienamente condivisi, a causa della variabilità sperimentale (Grassini et al., 2021; Stauffert et al., 2020). L'utilizzo di HMD con campi visivi più ampi e un maggiore realismo visivo dell'ambiente virtuale può aumentare la probabilità di soffrire di cybersickness (Bérastégui, 2024). La durata dell'esposizione alla realtà virtuale è un fattore noto nella gravità del cybersickness (Duřmařska et al., 2018) e anche i tratti individuali e le condizioni di salute contribuiscono a diverse esperienze dei sintomi (Grassini et al., 2020; Kim et al., 2021; Widyanti & Hafizhah, 2021).

Sebbene la realtà aumentata possa indurre cybersickness come la realtà virtuale (Kaufeld et al., 2022), è stato dimostrato che tale sintomatologia avversa è relativamente limitata nella realtà aumentata: uno studio ha riportato solo sintomi trascurabili di cybersickness tra i partecipanti, con la maggior parte che non ha manifestato alcun disagio e solo pochi che hanno manifestato sintomi minimi (Vovk et al., 2018). Una frequenza relativamente bassa di cybersickness nella realtà aumentata è stata rilevata anche nell'intervista 6. Tuttavia, l'intervistato ha osservato che sintomi come la cybersickness potrebbero colpire gli operatori nelle sale di controllo. È stato segnalato che gli operatori che monitorano flussi live da sistemi di realtà aumentata su schermi 2D soffrono di cybersickness, in particolare durante alcuni movimenti della telecamera dai visori trasmessi in streaming ai loro monitor.

⁹ Talvolta il fenomeno viene definito malessere da simulatore, malessere da realtà virtuale, cibercinetosi o cinetosi indotta visivamente.

¹⁰ La sensazione di disagio che si può provare, ad esempio, viaggiando come passeggeri su un veicolo.

Problemi di vista e salute oculare

Gli occhiali da vista utilizzano immagini stereoscopiche per creare una percezione della profondità, che può indurre affaticamento visivo (Grassini & Laumann, 2021; Hodges & Davis, 1993; Parker, 2016; Urey et al., 2011). Sebbene l'uso di occhiali da vista associ un significativo affaticamento visivo, la ricerca attuale non lo collega in modo conclusivo alla miopia dopo brevi esposizioni (Turnbull & Phillips, 2017). Tuttavia, l'uso prolungato di occhiali da vista associ può incoraggiare comportamenti favoriscono la miopia e influenzano le funzioni visive a lungo termine (Németh et al., 2021). La stereoscopia negli occhiali HMD mira a imitare la percezione della profondità nel mondo reale attraverso segnali binoculari e propriocettivi, a seconda della distanza interpupillare (IPD), che varia ampiamente da individuo a individuo (Lambooi et al., 2009; Stanney et al., 2020). Impostazioni IPD disallineate possono essere responsabili dell'affaticamento visivo (Hibbard et al., 2020) e può anche essere responsabile dell'affaticamento degli occhi quando il cervello non riesce a fondere le immagini in determinate posizioni e distanze, causando la visione doppia (Patterson, 2015).

Gli individui con una compromissione della percezione della profondità binoculare o un declino dell'acuità stereo correlato all'età corrono maggiori rischi (Bosten et al., 2015; Hess et al., 2015; Lambooi et al., 2009; Ramadan & Alhaag, 2018; Schubert et al., 2016). Inoltre, la luce blu degli schermi a diodo organico a emissione di luce (OLED) e a cristalli liquidi (LCD) può contribuire a questo affaticamento, influenzando la salute della retina e la messa a fuoco degli occhi (Ahmed et al., 2018; Heo et al., 2017; Lawrenson et al., 2017), con un ruolo anche della luminosità del display e della dinamica del colore (Erickson et al., 2020; Kim et al., 2016; Kweon et al., 2018). Infine, la visione inevitabile di angoli estremi all'interno dei visori VR è collegata a un rischio maggiore di sviluppare eteroforia, un disturbo caratterizzato dal disallineamento degli occhi quando non si mette a fuoco (GOV.UK, 2020).

Ricerche recenti indicano che, per prevenire sintomi oculari avversi, le sessioni di utilizzo dovrebbero essere limitate a un periodo compreso tra 55 e 70 minuti (Kourtesis et al., 2019). Tuttavia, è stato dimostrato che questa linea guida viene spesso superata in contesti professionali (Bérestégui, 2024).

È noto anche che le specifiche lunghezze d'onda e intensità della luce blu comportano rischi di danni temporanei e permanenti alle strutture oculari, con la retina particolarmente vulnerabile (Cougard-Gregoire et al., 2023). Sebbene non vi siano prove conclusive che suggeriscano che la normale esposizione agli schermi abbia un impatto negativo sulla salute della retina, le implicazioni dell'esposizione alla luce blu attraverso tecnologie XR avanzate sulla salute oculare non sono state ancora studiate a fondo.

Anche nell'intervista 7 sono stati segnalati problemi di fattore di forma che interagiscono con la vista dell'utente. Alcuni dispositivi di realtà aumentata oscurano una parte significativa del campo visivo dell'utente, in particolare in condizioni di scarsa illuminazione o in spazi ristretti. Questa limitazione può compromettere la consapevolezza situazionale e l'efficienza operativa, aumentando il rischio di incidenti. Inoltre, l'impatto psicologico di un campo visivo ridotto può portare ad un aumento dell'ansia e a una riduzione dell'efficienza nei compiti.

Disturbo del sonno

La ricerca dimostra inoltre che l'esposizione a determinati tipi di illuminazione comuni negli schermi, come la luce blu, sopprime la secrezione di melatonina, un ormone fondamentale nella regolazione dei cicli del sonno (Tähhkämö et al., 2019). Tuttavia, le implicazioni dell'esposizione alla luce blu attraverso tecnologie avanzate di raggi X sui disturbi del sonno non sono state ancora studiate a fondo.

Epilessia

I produttori di visori VR includono avvertenze di sicurezza sui rischi di epilessia, sottolineando che una piccola percentuale di utenti (circa uno su 4.000) potrebbe manifestare gravi vertigini, crisi epilettiche o svenimenti a causa dell'esposizione a lampi o pattern luminosi (Tychsen & Thio, 2020). È stato recentemente osservato che i livelli di luminosità fluttuanti dei visori VR possono rappresentare un rischio soprattutto per le persone predisposte all'epilessia fotosensibile (Bérestégui, 2024), e tale rischio professionale è stato precedentemente segnalato dall'Agenzia francese per la salute e la sicurezza alimentare, ambientale e del lavoro (ANSES, 2021, come citato in Bérestégui, 2024). Tuttavia, attualmente la ricerca sull'argomento è limitata e l'incidenza dell'epilessia tra gli utenti di VR sembra essere bassa (Tychsen & Thio, 2022).

Disturbi muscoloscheletrici

Storicamente riconosciuto fin dagli anni '90 (Nichols, 1999) nel contesto dei primi sistemi VR, l'affaticamento muscolare causato dalla VR è stato paragonato all'affaticamento causato dalle tradizionali attività al computer. Gli utenti di VR mostrano un maggiore stress fisico a causa di fattori come il peso dell'HMD su testa, collo e spalle (Kim & Shin, 2018).

Nella realtà virtuale, le interazioni degli utenti con gli ambienti generati dal computer dipendono principalmente dall'uso di HMD e dai movimenti di mani, testa, occhi e corpo (Kim et al., 2020; Monteiro et al., 2021). Queste interazioni possono causare affaticamento muscolare a causa di gesti non abituali e ripetitivi e dell'uso dell'hardware.

È stato ipotizzato che altri potenziali fattori possano essere in qualche modo correlati all'affaticamento e al disagio muscoloscheletrico (Souchet et al., 2023a; Souchet et al., 2023b); tuttavia, non sono stati pienamente esplorati nel contesto delle tecnologie VR. Tra questi, lo sforzo cognitivo (Brown et al., 2020), l'illuminazione dell'ambiente e la luminosità dello schermo (Merbah et al., 2020) e lo stress (Dehdashti et al., 2017).

Il peso dell'HMD influisce sulla coppia articolare del collo e sullo sforzo percepito (Chihara & Seo, 2018; Yan et al., 2018), influenzando l'affaticamento muscolare. Anche diversi gesti di interazione, inclusi i micro gesti, possono essere responsabili del disagio muscoloscheletrico (Li et al., 2020). Bourdin et al. (2019) hanno indicato un maggiore affaticamento fisico nella realtà virtuale e adattamenti motori inconsci negli ambienti VR.

Sebbene la realtà virtuale possa offrire una variazione delle attività che potrebbe alleviare il disagio muscoloscheletrico e quindi mitigare i rischi per la salute e la sicurezza sul lavoro esistenti sul posto di lavoro (Luger et al., 2014), esiste un rischio di infortuni dovuto a movimenti ripetitivi (van Tulder et al., 2007). La letteratura suggerisce la necessità di considerare l'affaticamento muscolare nell'uso della realtà virtuale e il comfort dell'utente in termini di salute e sicurezza sul lavoro, sebbene la piena portata di questo problema nella realtà virtuale non sia ancora chiara. Poiché le apparecchiature di realtà aumentata sono più leggere rispetto a quelle di realtà virtuale, è probabile che il problema dello stiramento muscolare sia meno evidente per le tecnologie simili alla realtà aumentata; tuttavia, nella letteratura scientifica attuale sono disponibili poche prove in merito (Marklin et al., 2020).

Le attuali conoscenze sul potenziale degli HMD di indurre problemi muscoloscheletrici sottolineano la necessità di progressi nella progettazione degli HMD, in particolare in termini di ergonomia e peso, per mitigare i rischi ergonomici e migliorare il comfort dell'utente (Ito et al., 2021; Vi et al., 2019). XR inadeguato o mal progettato

I sistemi possono contribuire ai disturbi muscoloscheletrici correlati al lavoro sul posto di lavoro, nonché ad altri problemi ergonomici (Souchet et al., 2023b).

Stile di vita sedentario al lavoro

Due intervistati (Interviste 3 e 4) hanno evidenziato una crescente preoccupazione legata alle tecnologie XR nel contesto della SSL: la loro capacità di aumentare la sedentarietà prolungata. Le tecnologie XR, progettate per immergere gli utenti in ambienti virtuali, spesso attraverso interazioni (generalmente) da seduti, promuovono inavvertitamente periodi prolungati di inattività fisica negli utenti. Questo spostamento verso un aumento del tempo sedentario solleva significative preoccupazioni in materia di SSL, dati i rischi per la salute ben documentati legati alla sedentarietà prolungata, come disturbi muscoloscheletrici, problemi cardiovascolari e problemi di salute mentale.

Irritazione cutanea

Le interviste hanno rivelato che l'uso prolungato di **dispositivi HMD** può causare problemi dermatologici, tra cui irritazione cutanea, nelle zone in cui il dispositivo è a contatto con la pelle (Bérestégui, 2024). Questo problema tende a peggiorare con l'uso prolungato del dispositivo ed è ulteriormente aggravato da un aumento della temperatura corporea dell'utente (generalmente osservato quando l'utente indossa il visore davanti agli occhi per un periodo prolungato), che porta a sudorazione. L'attuale design ergonomico dei dispositivi HMD gioca un ruolo significativo in questo problema. La letteratura scientifica e medica esistente non ha affrontato sufficientemente questo problema.

questo problema, rendendo difficile valutare la portata del problema o il numero di individui interessati.

Danni o lesioni corporee correlati alle batterie

Da un'intervista sono emersi problemi significativi, come i danni termici causati dal surriscaldamento delle batterie (Intervista 6). Le batterie che si surriscaldano o non funzionano correttamente possono causare danni alla pelle e ustioni, soprattutto se si trovano vicino al corpo dell'utente. Inoltre, le batterie al litio surriscaldato o danneggiate possono incendiarsi o esplodere, causando danni immediati all'utente e aumentando ulteriormente i rischi in ambienti critici per la sicurezza. Ciò è particolarmente rilevante per i sistemi di realtà aumentata progettati per, ad esempio

¹¹ Si prega di notare che il rischio di surriscaldamento ed esplosione delle batterie al litio dei sistemi XR è lo stesso di apparecchiature come telefoni cellulari e laptop. Tuttavia, poiché le tecnologie indossabili sono generalmente a stretto contatto con il corpo dell'utente, il rischio di danni fisici è elevato (vedere OSHA.gov, 2019).

ad esempio, assistere i lavoratori in ambienti ad alto rischio, dove scintille e accensioni possono causare esplosioni.

Scivolamenti, inciampi e cadute

I lavoratori che utilizzano i visori VR (HMD) per la realtà virtuale possono vedere solo l'ambiente virtuale, non quello reale, il che aumenta il rischio di infortuni dovuti a collisioni con oggetti nell'ambiente reale o a inciampi sui cavi del sistema VR (Bérestégui, 2024). L'uso di visori VR senza cavi e con confini virtuali, che consentono all'utente di rimanere all'interno di un'area sicura nel mondo reale, può contribuire a ridurre questi rischi (Bérestégui, 2024).

Secondo un rapporto del 2020 (GOV.UK, 2020), la realtà virtuale ha anche un impatto negativo sull'equilibrio e sulla coordinazione degli utenti quando indossano il visore per sessioni prolungate. Inoltre, dopo l'uso della realtà virtuale, gli individui spesso mostrano una ridotta percezione della profondità, tempi di reazione ritardati e difficoltà di concentrazione. Questi deficit cognitivi e percettivi aumentano il rischio di infortuni dovuti a incidenti come scivolamenti, inciampi e cadute.

Il fatto che l'uso della realtà virtuale possa causare cadute è stato discusso solo marginalmente nella letteratura scientifica. In particolare, Warner e Teo (2021) hanno documentato un caso in cui una caduta lieve durante l'uso della realtà virtuale ha portato a gravi conseguenze, tra cui danni al midollo spinale e al nervo ipoglosso, e dissezione dell'arteria vertebrale.

e lesioni cerebrali traumatiche. Gli effetti negativi dell'uso della tecnologia VR potrebbero essere particolarmente rilevanti per gli anziani, poiché l'età e altre comorbilità potrebbero causare danni significativi, anche a seguito di cadute di lieve entità.

In alcune interviste è stato menzionato anche un possibile aumento degli incidenti fisici, come inciampi o cadute dovuti alla distrazione causata dai contenuti di realtà aumentata (interviste 2 e 6).

4.2 Rischi psicosociali per la salute e la sicurezza sul lavoro correlati al lavoro e conseguenze per la salute

Le implicazioni della Realtà Virtuale (XR) per la SSL sono sempre più critiche a causa dei potenziali rischi per la salute mentale (Spiegel, 2017); tuttavia, questi rischi sono stati spesso trascurati nell'uso della realtà virtuale in contesti lavorativi e solo di recente la letteratura ha iniziato a valutarli sistematicamente (Biener et al., 2022). Questi rischi sono legati alla natura immersiva della Realtà Virtuale (XR), che tende a isolare l'utente in ambienti di lavoro virtuali ristretti. Inoltre, queste tecnologie sono spesso una novità, utilizzate da utenti relativamente inesperti, in genere privi di una formazione adeguata. Questo è un fattore che aumenta ulteriormente i rischi psicosociali associati alla Realtà Virtuale e porta a un aumento dello stress. Inoltre, l'interazione tra avatar nel metaverso apre la strada a interazioni sociali potenzialmente dannose per la salute.

Percezione e cognizione

I rischi per la salute e la sicurezza sul lavoro correlati alla percezione e alla cognizione sono comunemente segnalati nel contesto delle tecnologie XR. Questi rischi sono legati alla quantità di informazioni mostrate dai display e possono interferire con la normale funzione percettiva degli utenti. Ad esempio, le tecnologie possono distrarre gli utenti dall'ambiente reale o coprire con sovrapposizioni digitali parti importanti dell'ambiente di lavoro degli utenti, portando a rischi per la sicurezza dei lavoratori (ad esempio incidenti) e per la salute, in particolare per la salute mentale.

Infatti, una delle principali conseguenze dell'aumento del carico cognitivo è l'aumento della distrazione, che implica una maggiore probabilità di incidenti e infortuni sul lavoro. Carico cognitivo e carico di lavoro mentale

(termini spesso usati come sinonimi) si riferiscono all'utilizzo di risorse cognitive durante un compito, con la loro applicazione variabile a seconda dei contesti di apprendimento ed ergonomici (Leppink, 2017; Orru & Longo, 2019; van Acker et al., 2018). Le attività simili a quelle svolte in ufficio (ovvero quelle che i lavoratori generalmente svolgono alla scrivania) svolte in VR mostrano impatti variabili sul carico di lavoro mentale (Broucke & Deligiannis, 2019; Filho et al., 2018; Filho et al., 2018; Filho et al., 2019a; Filho et al., 2019b; Makransky et al., 2019; Shen et al., 2019; Tian et al., 2021; Zhang et al., 2017). È stato scoperto che la realtà virtuale può ridurre o aumentare il carico di lavoro mentale, a seconda delle caratteristiche del compito e della progettazione dell'interfaccia (Biener et al., 2020; Geiger et al., 2018; Speicher et al., 2018; Zielasko et al., 2019).

Fattori come la spazializzazione dei compiti (il modo in cui un particolare compito è distribuito nello spazio virtuale) e l'esperienza dell'utente in VR potrebbero anche essere responsabili del sovraccarico cognitivo (Armougum et al., 2019; Baceviciute et al., 2021; Bernard et al., 2019; Wismer et al., 2018). Ciò evidenzia l'importanza, da un lato, di una buona progettazione dell'interfaccia utente che non aumenti eccessivamente il sovraccarico cognitivo degli utenti, pur essendo ricca di informazioni, e, dall'altro, della formazione dei lavoratori per una migliore gestione del tipo di informazioni visualizzate in VR.

Confusione, disorientamento e alterazione del senso del tempo e dello spazio

Una delle interviste ha rivelato che è stato notato un impatto significativo sulla percezione e sulla cognizione dei lavoratori, portando a confusione e disorientamento (Intervista 7). Questo effetto può essere maggiore per gli utenti alle prime armi o per coloro che non hanno ricevuto un'adeguata formazione nell'uso delle tecnologie XR.

È stato proposto che l'uso eccessivo della realtà virtuale possa anche essere collegato a una percezione distorta del tempo (Mullen e Davidenko, 2021). Sebbene tali evidenze possano essere correlate a contesti esterni al lavoro, sono comunque potenzialmente rilevanti per la SSL nel contesto della consapevolezza situazionale degli utenti che può esporli a rischi e potenziali infortuni legati al lavoro. È stato riscontrato che l'uso della realtà aumentata è associato a un'errata interpretazione del tempo e dello spazio da parte degli utenti in situazioni reali, ad esempio sottostimando la velocità dei veicoli in arrivo o sovrastimando i tempi di reazione, con conseguente aumento del rischio di pericoli (Sabelman e Lam, 2015).

Ridotta consapevolezza della situazione

Le tecnologie di realtà aumentata possono aumentare gli errori umani in contesti critici di interazione uomo-macchina, come nel caso dei luoghi di lavoro manifatturieri (Bahaei, 2020). L'implementazione della realtà aumentata nei sistemi di sicurezza presenta rischi dovuti alla progettazione dei dispositivi e alle possibili distrazioni sul lavoro, potenzialmente critici soprattutto nei luoghi di lavoro ad alto rischio. (Tatic & Tesic, 2015). L'head-up display (HUD) dei veicoli¹² illustra un tipo specifico di AR che è stato collegato a un aumento degli errori di guida. Tali sistemi, pur mirando a migliorare la sicurezza, potrebbero oscurare gli scenari di traffico reali, aumentando il rischio di incidenti (Kim & Hwang, 2017). Wang et al. (2021) hanno scoperto che gli HUD AR potrebbero causare cecità da disattenzione¹³ nella guida ad alto carico di lavoro, ma potrebbero mitigarla quando i pedoni sono evidenziati. Inoltre, alcuni dispositivi AR riducono il campo visivo dell'utente, soprattutto in spazi scarsamente illuminati o ristretti (Intervista 7), compromettendo la consapevolezza situazionale e causando incidenti, ansia e minore efficienza operativa. L'effetto sulla sicurezza dell'HUD è particolarmente importante nel contesto della SSL, poiché i veicoli da lavoro pesanti sono spesso integrati con tali tipi di tecnologie.

Eccessiva dipendenza dalla tecnologia

L'intervista 7 ha evidenziato preoccupazioni su come le imprecisioni dei dati influiscano sulla consapevolezza situazionale dell'utente, soprattutto quando vengono impiegati algoritmi di apprendimento automatico per analizzare dati ambientali (ad esempio, sensori). Queste imprecisioni comportano rischi sostanziali per la salute e la sicurezza sul lavoro. In particolare, il disallineamento dei contenuti XR – in cui le informazioni virtuali non si sovrappongono o non corrispondono correttamente al mondo reale – è stato individuato come fonte di potenziali errori operativi. Questo disallineamento potrebbe portare a errori umani nel funzionamento dei macchinari o a risposte errate a causa di un eccessivo affidamento sulla tecnologia (potenzialmente difettosa).

L'intervista 7 ha inoltre evidenziato la possibilità che gli utenti possano in generale diventare eccessivamente dipendenti dalle tecnologie XR, soprattutto nel contesto della realtà aumentata. L'eccessiva dipendenza degli operatori dalla guida digitale potrebbe portare a gravi errori o valutazioni errate in scenari in cui non possono utilizzare la tecnologia e non possono più raccogliere dati ambientali utilizzando, ad esempio, sensori analogici. Questa dipendenza solleva anche interrogativi sulla perdita di competenze e sulle capacità dei lavoratori.

Senso di isolamento

Sebbene sia stato suggerito che la realtà virtuale promuova l'isolamento sociale in contesti specifici e non lavorativi (Schober, 2017), le prove non sono conclusive; un legame più ampio tra tecnologia informatica e isolamento sociale è stato discusso negli ultimi decenni (Hampton, 2009). L'effetto a lungo termine della sensazione di isolamento nella realtà virtuale non è stato studiato esplicitamente in contesti lavorativi, ma a causa del potenziale impatto sulla salute mentale dei lavoratori, questo merita di essere indagato in ambienti di lavoro che richiedono ai lavoratori di utilizzare la realtà virtuale per un periodo di tempo prolungato. I dati delle interviste hanno rivelato che il senso di isolamento potrebbe non essere ipotetico. Una delle persone intervistate (Intervista 4), un istruttore nel contesto della formazione in realtà virtuale, ha menzionato specificamente che alcuni lavoratori preferivano la formazione tradizionale in aula alla formazione in realtà virtuale a causa della sensazione di solitudine negli ambienti simulati in realtà virtuale. Tuttavia, questo potrebbe essere stato

attribuibile all'ambiente di formazione specifico e non generalizzabile alle tecnologie XR e metaverso.

¹² Sistemi che proiettano dati, come la velocità del veicolo, sui parabrezza.

¹³ La cecità da disattenzione è un fenomeno psicologico per cui un individuo non riesce a notare un oggetto completamente visibile ma inaspettato perché la sua attenzione è concentrata su qualcos'altro.

Frustrazione e ansia

Nel contesto della SSL, gli aspetti ansiogeni della realtà virtuale sono particolarmente preoccupanti. La natura immersiva della realtà virtuale può essere angosciante. Recenti scoperte indicano che la difficile usabilità delle attuali tecnologie XR (ad esempio, le difficoltà nell'uso dei dispositivi HMD) influisce negativamente sulla salute mentale. Un confronto tra le esperienze dei partecipanti che lavoravano 40 ore settimanali in realtà virtuale rispetto a un ambiente d'ufficio convenzionale (Biener et al., 2022) ha rivelato che gli utenti hanno sperimentato livelli più elevati di frustrazione (42%) e ansia (19%) durante l'utilizzo dei dispositivi HMD.

Cyberbullismo

Il progresso verso ambienti virtuali più realistici introduce rischi di interazioni indesiderate.

Il cyberbullismo, come identificato dai ricercatori (Upadhyay et al., 2023), diventa un problema significativo negli spazi immersivi, consentendo nuove forme di interazione con gli utenti (Bérestégui, 2024; Dwivedi et al., 2023).

Questa forma di bullismo include molestie e simulazioni di aggressioni fisiche, con potenziali effetti sulle vittime a livello emotivo e psicologico (Porta et al., 2024). Gli sviluppi in corso nella tecnologia tattile, che consentono agli utenti di percepire il contatto virtuale come sensazioni fisiche reali, se utilizzati insieme alle tecnologie XR o metaverse, potrebbero anche trasformare la violenza virtuale, ad esempio tra due avatar, in una vera e propria forma di violenza fisica, grazie al miglioramento delle tecnologie di rilevamento (Bérestégui, 2024).

Inoltre, la scelta di un avatar influenza significativamente il comportamento dell'utente nelle interazioni digitali (Bérestégui, 2024). La ricerca mostra che gli individui adattano le proprie azioni per allinearsi all'aspetto del proprio avatar (Peña et al., 2022), mostrando maggiore sicurezza ed estroversione con avatar percepiti come alti e attraenti. Questo fenomeno, noto come effetto Proteo, è stato recentemente identificato nella letteratura sul rischio delle tecnologie del metaverso (Bérestégui, 2024). Questo effetto potrebbe esacerbare il cyberbullismo nella realtà virtuale, dove gli avatar mediano tutte le interazioni. È stato dimostrato che le tecnologie XR amplificano l'effetto Proteo più dei tradizionali display 2D (Beyea et al., 2022).

Inoltre, interagire con un personaggio virtuale provocatorio può provocare livelli di ansia significativamente più elevati nella realtà virtuale rispetto a uno schermo piatto, in gran parte a causa del maggiore senso di presenza fisica (Dickinson et al., 2021). L'incidenza di molestie tramite avatar e crimini sessuali virtuali (Brandon, 2024; Clement, 2022; Wiederhold, 2022) solleva serie preoccupazioni per la sicurezza dei lavoratori, richiedendo l'implementazione di misure legali e normative più severe, insieme a tutele tecnologiche come l'autenticazione a due fattori e la verifica biometrica, per contrastare l'impersonificazione e tracciare attività dannose.

Queste misure sono fondamentali per garantire un ambiente di lavoro virtuale sicuro, protetto e rispettoso. La sfida per i provider è bilanciare le misure di protezione con il mantenimento della qualità immersiva dell'esperienza.

Dipendenza

È stata osservata negligenza personale associata a dipendenza in caso di uso eccessivo dei media (Andreassen et al., 2012; Dam et al., 2023) e si prevede che l'esposizione prolungata alla realtà virtuale possa intensificare questa preoccupazione. È stato riscontrato che tra il 2% e il 20% degli utenti di tecnologie VR mostra un uso compulsivo della realtà virtuale (Barreda-Ángeles & Hartmann, 2022), sottolineando la natura potenzialmente addictive di tali tecnologie immersive. Altri studi hanno inoltre evidenziato il potenziale problema di dipendenza connesso al metaverso (Bojić, 2022). Sebbene queste preoccupazioni non siano state testate sperimentalmente in contesti lavorativi, le evidenze provenienti da altri ambiti suggeriscono la necessità di ulteriori indagini sulle potenziali implicazioni in materia di SSL.

Stress acuto e tecnostress

Le tecnologie XR nei luoghi di lavoro possono innescare sia stress acuto che tecnostress a causa di problemi tra cui Complessità tecnologica, lacune nelle competenze digitali e sovraccarico di informazioni. Lo stress acuto è caratterizzato da risposte di stress improvvise o di breve durata che possono compromettere funzioni cognitive come la funzione esecutiva, l'attenzione selettiva, la memoria di lavoro, il consolidamento della memoria e la capacità di richiamare (Klier & Buratto, 2020; LeBlanc, 2009; Shields et al., 2016). Il tecnostress, invece, deriva specificamente dall'uso delle tecnologie digitali sul posto di lavoro (Bondanini et al., 2020; Khan, 2023; Mahapatra & Pillai, 2018). La gestione di più flussi di informazioni può anche aumentare il ritmo e il volume di lavoro, contribuendo al tecnostress (Atanasoff & Venable, 2017; Tarafdar et al., 2019). Inoltre, le riunioni in realtà virtuale possono provocare ansia da public speaking, un noto fattore di stress (Owens & Beidel, 2015; Takac et al., 2019).

4.3 Rischi e conseguenze per la SSL correlati agli aspetti etici e legali

A causa della natura immersiva della XR e dei paesaggi digitali interconnessi del metaverso, ci sono considerazioni etiche e legali per la privacy degli utenti, la sicurezza dei dati, la moderazione dei contenuti e il potenziale per l'uso improprio della tecnologia. Questi rappresentano aree di rischio per la SSL che potrebbero causare un aumento dello stress e dell'ansia nei lavoratori (Canbay et al., 2022; EU-OSHA, 2023b).

Mentre i lavoratori navigano in questi spazi digitali, i confini sfumati tra realtà e virtualità pongono sfide specifiche nel garantire interazioni etiche e nella tutela contro la violazione dei diritti. La creazione di avatar digitali, la raccolta di dati biometrici e comportamentali e il potenziale di sorveglianza e monitoraggio all'interno di queste tecnologie sono tutti esempi di rischi per la salute e la sicurezza sul lavoro derivanti dall'uso delle tecnologie XR e del metaverso sul posto di lavoro. Le preoccupazioni relative alla privacy e la possibilità di violazioni dei dati personali sono esempi di rischi che, se non adeguatamente prevenuti e/o gestiti, possono causare

stress per i lavoratori che utilizzano tecnologie XR. Tutte le interviste hanno evidenziato il potenziale monitoraggio continuo dei lavoratori come uno dei punti più critici per l'adozione delle tecnologie.

Registrazione dei dati personali, monitoraggio continuo e gestione dei lavoratori

L'integrazione della tecnologia XR nei luoghi di lavoro pone seri problemi di privacy e sicurezza dei dati dei lavoratori, che rappresentano entrambi rischi per la salute e la sicurezza sul lavoro (EU-OSHA, 2022a, 2022b, 2023b) a causa della capacità della tecnologia per raccogliere dati personali in vari modi (Hine et al., 2023), comprese le "impronte digitali cinematiche" personali¹⁴ (Spiegel, 2017). Questa preoccupazione si estende ai dispositivi di realtà aumentata, che possono registrare l'ambiente circostante e gli astanti. Solleva questioni sia per la registrazione consensuale (l'esistenza di dati registrati è fondamentale per l'utente, anche nelle registrazioni consensuali, poiché i dati possono essere rubati o utilizzati in modo improprio)¹⁵ che per quella non consensuale e per l'invasione della privacy, nonché preoccupazioni per l'uso inappropriato o non informato di tali registrazioni.

Poiché gli HMD con sensori integrati consentono il monitoraggio dei lavoratori e delle loro prestazioni, l'uso di tali dispositivi può esacerbare i rischi per la salute e la sicurezza sul lavoro associati al lavoro a distanza quando utilizzati in questa forma di lavoro, come una maggiore intensità di lavoro, pressione sulle prestazioni e microgestione (Bérestégui, 2024; EU-OSHA, 2023c). Più in generale, si teme che il metaverso possa portare a un rafforzamento controllo manageriale (Bérestégui, 2024).

Sondaggi e studi evidenziano un certo disagio nei confronti del potenziale della realtà aumentata per registrazioni non autorizzate e una preferenza per tecnologie che lo impediscano (Denning et al., 2014; Rauschnabel et al., 2018). L'onnipresenza delle telecamere nelle tecnologie XR richiede rigorose politiche di protezione dei dati e della privacy per tutelare i lavoratori, sottolineando l'importanza per i datori di lavoro e i responsabili della sicurezza e della salute sul lavoro di dare priorità a queste preoccupazioni, soprattutto nel contesto del metaverso. Tutte le interviste hanno toccato la questione della privacy legata alla registrazione dei dati personali, con alcune che hanno specificamente fatto riferimento al timore di un monitoraggio continuo come preoccupazione comune (Interviste 5 e 7).

Diminuzione della responsabilità morale

Da una prospettiva di SSL, il concetto di "abbandono dei vincoli esterni" nella realtà virtuale (Cranford, 1996) evidenzia il rischio di una diminuzione della responsabilità morale dovuta alla percepita mancanza di rischi e conseguenze nel mondo reale. Questo fenomeno è simile agli impatti negativi documentati dell'anonimato online, suscitando preoccupazioni sull'influenza della realtà virtuale sull'etica sociale. Gooskens (2010) sottolinea l'immersione emotiva nella realtà virtuale rispetto alle rappresentazioni teatrali tradizionali, mettendo in guardia dai rischi morali qualora le azioni virtuali iniziassero a influenzare il comportamento nel mondo reale. Questo problema è particolarmente acuto in contesti multiutente e connessi (Ford, 2001), dove la distinzione tra identità virtuali e reali diventa oscura, portando a un aumento dei comportamenti contrari allo standard morale comune o alla legge, che potrebbero avere un impatto sulla sicurezza e la salute dei lavoratori, inclusa la salute mentale.

violazioni della sicurezza

Il metaverso porta con sé sfide significative in materia di salute e sicurezza sul lavoro, data la sua proprietà fondamentale di interconnessione (Sharma & Zamfiroiu, 2023). Questa caratteristica consente a entità maligne, potenzialmente esterne all'ambiente di lavoro, di raccogliere dati sensibili dai lavoratori, inclusi dati comportamentali e biometrici. Pertanto, le questioni della sicurezza informatica e della protezione dei dati personali all'interno del metaverso sono cruciali da un punto di vista OSH

¹⁴ Modelli specifici di movimenti che possono essere utilizzati per identificare una persona, ad esempio il movimento degli occhi e i riflessi.

¹⁵ In questo contesto, vedere anche O'Brolcháin et al. (2015) per una discussione sulle impronte digitali e sui potenziali casi di uso improprio dei dati personali nel contesto della XR.

prospettiva, che richiede soluzioni per prevenire i rischi e i loro impatti in termini di stress e problemi di salute mentale (EU-OSHA, 2023b). Questa suscettibilità del metaverso aumenta il potenziale di frode (Cheong, 2022; Smaili & de Rancourt-Raymond, 2022) e furto di identità (Dwivedi et al., 2023), sollevando notevoli preoccupazioni in materia di SSL quando questi sistemi vengono integrati nei luoghi di lavoro.

4.4 Rischi biologici: trasmissione di malattie infettive

Le apparecchiature HMD possono diventare un veicolo per agenti patogeni che gli utenti possono trasmettersi a vicenda. Il potenziale di contaminazione incrociata tra gli utenti con batteri è relativamente elevato nel contesto dell'uso di HMD, poiché diversi utenti utilizzano comunemente la stessa apparecchiatura in contesti lavorativi. Una ricerca di Creel et al. (2020) ha identificato ceppi di *Staphylococcus aureus* con elevata resistenza agli antibiotici sui naselli e sulla fronte degli HMD VR, utilizzati in un corso di sviluppo software. Questi batteri, comunemente presenti sulla pelle e nelle vie respiratorie, possono causare gravi patologie come infezioni del flusso sanguigno, polmonite e infezioni a carico di ossa e articolazioni in individui sani. Nello studio sono stati riscontrati anche altri batteri, parte della normale flora batterica umana ma potenzialmente dannosi per chi ha un sistema immunitario indebolito o altri rischi per la salute. La contaminazione virale è stata meno studiata nel contesto dei dispositivi di protezione individuale (HMD); tuttavia, è noto che alcuni virus possono sopravvivere a lungo sulle superfici (Marzoli et al., 2021) e ciò è particolarmente pericoloso a causa della vicinanza degli HMD agli occhi e alla bocca di chi li indossa.

Il problema della trasmissione tra i lavoratori è particolarmente critico quando l'attrezzatura non viene pulita adeguatamente tra un utilizzo e l'altro. Recentemente sono state proposte alcune linee guida su come gestire i rischi di contaminazione degli HMD (Roberts et al., 2022). Le salviette detergenti con alcol isopropilico o con ammonio quaternario senza alcol si sono rivelate efficaci nel ridurre la contaminazione e il rischio di infezione dei visori VR.

Considerate le difficoltà che alcuni utenti incontrano nel pulire correttamente i dispositivi HMD (Easa, 2021), innovazioni come le mascherine sostituibili e la schiuma protettiva per i visori stanno emergendo come strategie efficaci per mitigare i rischi biologici. Al culmine della pandemia di COVID-19, diverse aziende hanno proposto la tecnologia UV prodotti igienizzanti a base di luce specificamente progettati per gli HMD (Moore et al., 2021).

4.5 Altre importanti questioni relative alla SSL

Le interviste hanno evidenziato una serie di ulteriori questioni relative all'uso delle tecnologie XR e metaverso con implicazioni in materia di SSL che vale la pena analizzare.

Integrazione problematica con i dispositivi di protezione individuale

Un problema notevole è la sfida di integrare l'hardware XR nei dispositivi di protezione individuale esistenti (DPI), in particolare dispositivi di protezione individuale, occhiali protettivi (Intervista 2) e caschi.

Un disallineamento può compromettere l'efficacia sia del sistema XR che dell'equipaggiamento protettivo, con conseguenti rischi per la sicurezza. Le implicazioni psicologiche includono una diminuzione della fiducia nella sicurezza personale e un aumento del carico cognitivo dovuto a preoccupazioni sull'affidabilità delle apparecchiature.

Disagio per l'utente dovuto all'ergonomia dell'hardware

La maggior parte delle interviste ha evidenziato il fatto che indossare i dispositivi HMD sia in qualche modo scomodo. Si tratta di un problema serio da affrontare quando si introducono tecnologie XR nell'ambiente di lavoro. Non solo potrebbe avere un impatto negativo sull'accettazione della tecnologia da parte dei lavoratori e sulle prestazioni lavorative complessive, ma, cosa ancora più importante, potrebbe anche compromettere la concentrazione dei lavoratori e aggravare i rischi esistenti per la salute e la sicurezza sul lavoro, aumentando i livelli di stress e il rischio di incidenti.

Mancanza di dati empirici per diversi contesti industriali

Le interviste hanno evidenziato una lacuna generale nei dati empirici sui rischi per la SSL derivanti dall'uso di materiali a raggi X sul posto di lavoro e, in particolare, una mancanza di dati empirici sui rischi per tipologia di settore e di utilizzo. La mancanza di dati empirici sui rischi associati alla resistenza all'acqua ostacola una comprensione completa e strategie di mitigazione. (Intervista 6). Questa lacuna nella ricerca rende difficile la creazione di politiche e linee guida informate in materia di SSL, con il rischio di rischi di SSL non affrontati. Inoltre, è stato segnalato un utilizzo non testato di apparecchiature XR, in cui le industrie utilizzano le apparecchiature per scopi non testati dal produttore (Intervista 6).

L'uso della tecnologia XR in scenari non testati comporta rischi aggiuntivi, poiché la sicurezza e l'efficacia dei dispositivi non sono state stabilite empiricamente, il che comporta potenziali sviste in materia di sicurezza e pericoli non affrontati sul posto di lavoro.

Conoscenza limitata degli usi e dei rischi a lungo termine

Le tecnologie XR vengono utilizzate principalmente per attività specifiche o brevi sessioni di formazione. Ciò limita la nostra comprensione del loro pieno potenziale e dei rischi associati a lungo termine, nei casi in cui queste tecnologie vengono implementate per un periodo più lungo in alcuni contesti lavorativi. Ciò influisce sul modo in cui i rischi in materia di SSL vengono percepiti e gestiti: i datori di lavoro percepiscono i rischi come limitati (poiché la conoscenza della SSL è limitata al breve periodo di utilizzo delle tecnologie nei luoghi di lavoro) e pertanto non comunicano efficacemente tali rischi e potenziali criticità agli operatori. Ciò, a sua volta, può avere un impatto sulla salute dei lavoratori.

Percezione dell'affidabilità e della sicurezza della tecnologia. Questa criticità è stata evidenziata in alcune interviste (Interviste 2, 3 e 4). È stata inoltre evidenziata una potenziale mancanza di segnalazione di criticità e rischi (Intervista 5) e una preoccupante mancanza di evidenze empiriche sui rischi dell'uso della radiografia a raggi X (Intervista 2).

Comunicazione limitata della valutazione dei rischi sul posto di lavoro sui rischi di SSL per i lavoratori

Le interviste hanno mostrato che le aziende spesso trascurano le tecnologie XR nella valutazione dei rischi sul posto di lavoro, che è un obbligo legale del datore di lavoro ai sensi della Direttiva Quadro sulla Salute e Sicurezza sul Lavoro. Questa trascuratezza sembra derivare da due diverse ragioni. In primo luogo, in molti settori vi è una scarsa consapevolezza dei potenziali rischi associati all'utilizzo delle tecnologie XR. In secondo luogo, il management spesso percepisce questi rischi come minimi, giustificando l'uso delle tecnologie XR come tipicamente breve e limitato. I dati hanno costantemente evidenziato una diffusa carenza sia di consapevolezza che di comunicazione di questi rischi in diversi settori. Tuttavia, è stato osservato che i settori con una lunga storia di utilizzo di dispositivi XR hanno sviluppato un approccio più solido alla valutazione dei rischi, alla comunicazione e alla definizione di linee guida chiare (Intervista 7).

Il divario digitale e la disuguaglianza

Le differenze nella comprensione e nell'adozione della tecnologia XR, in particolare tra diverse fasce d'età e livelli di alfabetizzazione digitale, possono influenzare il modo in cui la XR viene integrata e gestita sul posto di lavoro, portando potenzialmente a disparità nella competenza tecnologica e nell'accettazione della tecnologia (Intervista 1). Molti dispositivi XR basati su HMD non sono progettati per utenti eterogenei (Derby et al., 2023; Grassini & Laumann, 2020a), escludendo potenzialmente determinate fasce demografiche e limitando l'inclusività e l'efficacia della tecnologia. Questa esclusione può avere implicazioni significative sulla salute mentale, contribuendo a sentimenti di emarginazione e disuguaglianza sul posto di lavoro.

5 Discussione e conclusioni

Dal punto di vista della SSL, l'integrazione delle tecnologie XR e del metaverso sul posto di lavoro presenta sia potenziali benefici che rischi intrinseci. Ciò richiede un approccio equilibrato tra l'utilizzo dei progressi tecnologici e la prevenzione e la gestione dei rischi per la SSL.

L'applicazione delle tecnologie XR sul posto di lavoro offre **opportunità significative** in diversi ambiti legati alla SSL: formazione in materia di SSL, lavoro e orientamento a distanza, interpretazione complessa e rapida di dati ambientali o sensoriali e progettazione di un ambiente di lavoro più razionale e sicuro. Tuttavia, queste opportunità dovrebbero essere considerate nel contesto di diversi rischi identificati per la SSL, in particolare in ambienti con pericoli intrinseci. La revisione della letteratura e le interviste con esperti indicano che l'uso di queste tecnologie è generalmente approvato, sottolineandone il potenziale per **migliorare le prestazioni lavorative, l'efficienza e la sicurezza e la salute sul lavoro in generale**, e sottolineando che la maggior parte dei rischi segnalati oggi può essere mitigata grazie ai progressi tecnologici in ambito software e hardware.

L'uso di tecnologie XR e metaverse segna un passo avanti nel **miglioramento della SSL attraverso ambienti di formazione privi di rischi**, consentendo la simulazione di scenari pericolosi senza rischi reali. Ad esempio, gli operai edili possono sperimentare in sicurezza lavori ad alta quota, mentre gli operai manifatturieri possono utilizzare macchinari pesanti a distanza in un ambiente virtuale. Le sessioni di formazione immersive in realtà virtuale non solo contribuiscono allo sviluppo delle competenze, ma potrebbero anche promuovere una cultura della sicurezza e della consapevolezza in materia di SSL, oltre a contribuire all'identificazione dei rischi lavorativi.

L'adozione di tecnologie simili al metaverso per **la collaborazione remota riduce significativamente i rischi di salute e sicurezza sul lavoro** allontanando i lavoratori dagli ambienti pericolosi, eliminando la necessità di spostamenti fisici verso il

sul posto di lavoro (con le opportunità e i rischi in materia di SSL che ciò comporta),¹⁶ dimostrandosi cruciale durante le crisi sanitarie globali e mantenendo una comunicazione e un lavoro di squadra efficaci. Inoltre, queste tecnologie aiutano a **dare priorità alle considerazioni di sicurezza ed ergonomia nelle fasi di progettazione e prototipazione**, affrontando i potenziali rischi in materia di SSL in una fase iniziale e promuovendo un ambiente più sicuro per i lavoratori. Garantiscono inoltre **l'accessibilità sul posto di lavoro**, offrendo potenzialmente interfacce personalizzate per i lavoratori con disabilità, essenziali per l'inclusività e il rispetto degli standard di sicurezza legali. Nella pianificazione immobiliare e degli spazi, gli strumenti XR e metaverso facilitano la **valutazione dei protocolli di sicurezza e di emergenza**, contribuendo allo sviluppo di spazi commerciali e residenziali più sicuri. Nel settore sanitario, queste tecnologie aumentano la sicurezza dei pazienti e degli operatori sanitari offrendo piattaforme per migliorare l'educazione dei pazienti e la pratica senza il rischio di errori nella vita reale.

Infine, l'integrazione dei dati dei sensori e delle analisi negli ambienti XR e metaverso **migliora la sicurezza e la salute sul lavoro gestione** consentendo la visualizzazione intuitiva dei potenziali pericoli, il monitoraggio della conformità e la pianificazione della manutenzione, garantendo un ambiente di lavoro più sicuro.

Tuttavia, esplorare le tecnologie XR e metaverse richiede un'analisi approfondita dei **molteplici rischi e delle implicazioni** che queste tecnologie comportano per la SSL. La loro integrazione in contesti professionali introduce una complessa combinazione di rischi per la SSL e impatti sulla sicurezza e salute dei lavoratori che questo articolo tenta di classificare come fisici o ergonomici, psicosociali, etici o legali e biologici, ampliando i precedenti tentativi di categorizzare i rischi per la SSL nell'uso della XR sul posto di lavoro (The AREA, 2024a).

L'uso delle tecnologie XR sul lavoro è influenzato principalmente da **significativi rischi fisici ed ergonomici**

Grazie all'ergonomia dei dispositivi HMD. Il disagio, la tensione al collo e l'affaticamento visivo derivanti dalla **progettazione e dall'uso degli HMD** dovrebbero stimolare miglioramenti ergonomici nelle future iterazioni delle tecnologie, se si vuole che queste siano implementate efficacemente negli ambienti di lavoro. Inoltre, l'insorgenza di **cybersickness**, che rispecchia i sintomi della cinetosi, evidenzia la necessità critica di uno sforzo collaborativo tra sviluppatori hardware e software per progettare esperienze che siano sia intuitive che intuitive.

rispettoso dell'ambiente e non dannoso per la sicurezza, la salute e il benessere dei lavoratori. Tra i problemi di salute e sicurezza sul lavoro segnalati frequentemente dagli intervistati figurano anche il **rischio di convulsioni** innescate da specifici schemi visivi e i rischi termici associati alle **batterie dei dispositivi XR**.

Oltre ai rischi fisici, anche i **rischi psicosociali** associati alle tecnologie XR sollevano serie preoccupazioni per la salute mentale dei lavoratori. Esempi di tali rischi psicosociali includono **l'isolamento sociale, l'ansia** e il potenziale di interazioni negative negli ambienti virtuali, come **molestie basate su avatar e cyberbullismo**. Creare ambienti XR che promuovano un coinvolgimento sociale positivo e forniscano adeguati meccanismi di supporto è essenziale per mantenere un sano equilibrio tra utilizzo della tecnologia e salute mentale. È importante sottolineare che le interviste condotte nell'ambito di questo studio hanno rivelato che questi rischi sono tra i **meno valutati** e che la letteratura scientifica fornisce prove molto limitate su tali rischi rilevanti per l'uso delle tecnologie XR sul posto di lavoro. Sono pertanto necessarie ulteriori valutazioni urgenti.

Inoltre, le tecnologie XR e metaverse possono potenzialmente sopraffare i lavoratori, causando **un sovraccarico cognitivo**, compromettendo il processo decisionale e aumentando gli errori, mettendo a rischio la sicurezza e la salute dei lavoratori. Gli intervistati hanno evidenziato l'aumento del rischio di incidenti come **inciampi e cadute** dovuto all'elevato carico di lavoro cognitivo o alla distrazione da contenuti XR, riflettendo le preoccupazioni relative alla perdita di **consapevolezza dell'ambiente circostante**. Tali importanti effetti negativi evidenziano l'importanza di creare interfacce XR cognitivamente ergonomiche e di personalizzare le esperienze XR per supportare i lavoratori.

processi cognitivi senza causare stress e incidenti eccessivi. L'obiettivo è garantire che le tecnologie XR contribuiscano positivamente sia alla produttività sul posto di lavoro che alla SSL. Per mitigare tali rischi, esperti e ingegneri di esperienza utente o interfaccia (UX/UI) dovrebbero collaborare, cercando di creare interfacce e software cognitivamente compatibili e di elaborare linee guida per una visualizzazione efficace delle informazioni nelle simulazioni VR o nelle sovrapposizioni di AR all'ambiente reale.

Anche le questioni etiche e legali svolgono un ruolo cruciale nelle implicazioni in termini di SSL delle tecnologie XR e del metaverso.

Problemi di privacy, sfide per la sicurezza dei dati e rischio di **violazione e uso improprio dei dati**.

richiedono l'istituzione di rigorosi standard etici, solide tutele della privacy e chiari quadri giuridici. È fondamentale garantire che le piattaforme XR non solo rispettino i diritti dei lavoratori, ma promuovano anche interazioni etiche. Ciò implica la protezione dei dati personali dei lavoratori, la prevenzione di interazioni basate su avatar

¹⁶ Consultare le pubblicazioni EU-OSHA sulle implicazioni del lavoro a distanza in materia di SSL all'indirizzo

<https://osha.europa.eu/it/pubblicazioni-area-prioritaria/lavoro-remoto-e-ibrido>

molestie e sostenendo una chiara distinzione tra comportamenti virtuali e standard etici del mondo reale. Con l'avvento del metaverso (e la possibilità che includa contenuti generati dall'intelligenza artificiale), i rischi legati all'utilizzo dei dati stanno emergendo in modo evidente. Queste problematiche etiche e legali possono generare stress e ansia nei lavoratori e avere conseguenze negative sulla loro salute mentale.

La revisione della letteratura ha inoltre individuato **rischi biologici** correlati all'uso di dispositivi di protezione individuale (HMD). Questi riguardano la possibilità che l'apparecchiatura venga contaminata da agenti patogeni e, di conseguenza, possa contribuire alla trasmissione di batteri e virus e alle infezioni tra gli utenti.

Inclusività e accessibilità sono considerazioni fondamentali nell'implementazione delle tecnologie XR sul posto di lavoro, emerse sia dalla letteratura scientifica che dalle interviste. Molti dispositivi HMD XR non sono progettati per una vasta gamma di utenti e potrebbero escludere determinate fasce demografiche (ad esempio, le donne sono generalmente più suscettibili a effetti collaterali come la cinetosi). Le interviste hanno evidenziato preoccupazioni circa l'idoneità dei dispositivi XR a diverse corporature, età e abilità. Queste problematiche limitano l'efficacia e l'inclusività della tecnologia e possono avere implicazioni significative sulla salute mentale, contribuendo a sentimenti di emarginazione e disuguaglianza sul posto di lavoro. Ciò sottolinea la necessità di pratiche di progettazione inclusive che tengano conto della diversità della forza lavoro.

Infine, le interviste hanno anche rivelato che l'attuale XR prevede procedure di standardizzazione limitate o obblighi di conformità ai requisiti di certificazione (Intervista 6). L' **attuale mancanza di standardizzazione** ostacola l'adozione di queste tecnologie, soprattutto in ambienti di lavoro a rischio, che potrebbero essere più restii a introdurre tecnologie con specifiche non certificate, che potrebbero non essere considerate intrinsecamente sicure. Inoltre, alcuni settori affrontano la sfida di **integrare i dispositivi HMD con i dispositivi di sicurezza esistenti** (ad esempio occhiali protettivi, caschi di sicurezza), a causa di problemi di scarsa ergonomia dei dispositivi HMD.

In conclusione, affrontare questi rischi e sfide è importante per garantire la sicurezza e la salute sul lavoro dei lavoratori negli ambienti che impiegano tecnologie XR e metaverse, soprattutto se **i dispositivi HMD vengono indossati per lunghi periodi di tempo**. Poiché gli **impatti negativi di tali tecnologie sugli utenti sembrano cumularsi** con la frequenza d'uso, vi sono **preoccupazioni circa il loro utilizzo prolungato nei contesti lavorativi**.

Sebbene il presente documento riconosca il potenziale positivo dell'integrazione delle tecnologie XR e metaverse nei luoghi di lavoro, sottolinea anche la necessità di una **comprensione completa delle loro implicazioni in materia di SSL**. In particolare, è necessario indagare gli effetti sui lavoratori **dell'esposizione combinata all'intera gamma di potenziali rischi per la SSL**, e non solo quelli associati alle tecnologie XR o metaverse stesse, ma anche all'ambiente lavorativo, piuttosto che a ciascun rischio separatamente. Questa comprensione è fondamentale per lo sviluppo di **strategie e quadri di riferimento efficaci che prevengano e mitigano i rischi per la SSL**, garantendo l'integrazione sicura ed etica di queste tecnologie nei contesti lavorativi e nella società in generale.

6 Considerazioni e indicazioni politiche

L'integrazione delle tecnologie XR negli ambienti di lavoro richiede una guida personalizzata che tenga conto della prospettiva di SSL. Le seguenti linee guida si concentrano sulla garanzia della sicurezza e della privacy dei sistemi XR, nonché sulla sicurezza, la salute e il benessere dei lavoratori che li utilizzano. Raccomandazioni per l'introduzione della XR nei luoghi di lavoro sono state formulate in altra letteratura; le linee guida qui presentate tengono conto di discussioni, politiche e pratiche precedenti (si veda, ad esempio, Abraham et al. (2022), Adhyaru e Kemp (2022) e The AREA (2024b)), nonché delle nuove intuizioni emerse da questo studio, in particolare dalle interviste e dalla prospettiva di SSL da cui è stata analizzata la letteratura esaminata.

6.1 Linee guida e indicazioni politiche per l'implementazione delle tecnologie XR e metaverso sul posto di lavoro

- **Design ergonomico dei dispositivi XR.** I dispositivi XR utilizzati sul posto di lavoro devono essere progettati ergonomicamente per prevenire sforzi o lesioni. Ciò include cinghie regolabili, materiali leggeri e Considerazioni per un utilizzo prolungato. Le linee guida OSH sulle pratiche ergonomiche devono essere integrate nella progettazione e nell'implementazione di questi dispositivi.
- **Programmi regolari di formazione e sensibilizzazione.** Tenere sessioni di formazione regolari per familiarizzare lavoratori con l'uso sicuro ed efficiente delle tecnologie XR. Questi programmi dovrebbero anche coprire

pratiche sulla privacy, protocolli di sicurezza dei dati e consapevolezza dei potenziali impatti sui rischi di SSL, in linea con gli standard di SSL.

- ÿ **Monitoraggio e mitigazione degli impatti sulla salute mentale dei lavoratori.** Mettere in atto meccanismi di monitoraggio per valutare l'impatto dell'uso (prolungato) di raggi X sulla salute mentale dei lavoratori, come sovraccarico cognitivo, affaticamento o disorientamento correlati agli XR. Fornire supporto alla salute mentale e stabilire limiti di utilizzo può aiutare a prevenire o mitigare i rischi.
- ÿ **Protocolli di risposta alle emergenze in ambienti XR.** Sviluppare e integrare protocolli di risposta alle emergenze nei sistemi XR. In caso di emergenza reale, gli utenti dovrebbero essere in grado di disconnettersi rapidamente dall'ambiente XR. Questi protocolli includerebbero procedure di uscita di facile accesso e avvisi che potrebbero interrompere l'esperienza immersiva.
- ÿ **Audit di conformità per l'utilizzo di XR.** Pianificare audit di conformità regolari da parte di società di revisione specializzate o team di conformità interni, per garantire che l'utilizzo della tecnologia XR soddisfi gli standard legali, etici e di SSL. Questi audit possono aiutare a identificare aree di miglioramento e garantire che le tecnologie XR vengano utilizzate in modo responsabile e sicuro.
- ÿ **Trasparenza nella raccolta e nell'utilizzo dei dati personali.** In un contesto lavorativo, è fondamentale comunicare in modo trasparente ai lavoratori quali dati i sistemi XR stanno raccogliendo e quando. Inoltre, la chiarezza su dove e come i dati vengono elaborati (internamente o esternamente) è essenziale per i lavoratori. Questa trasparenza non solo è in linea con gli standard sulla privacy, ma promuove anche un ambiente di lavoro basato sulla fiducia.
- ÿ **Sviluppo di standard e linee guida XR specifici per il luogo di lavoro.** Le interviste condotte per questa ricerca hanno sottolineato l'attuale mancanza, e la necessità, di standard e linee guida specifici per il luogo di lavoro per l'uso di XR e tecnologie metaverse. Questi standard e linee guida dovrebbero comprendere la raccolta dei dati, la privacy e le questioni di sicurezza, ma anche la prevenzione dei rischi per la sicurezza e la salute dei lavoratori associati all'uso di raggi X evidenziati in questo documento. Ciò contribuirà alla creazione di ambienti XR sicuri e salubri e alla salvaguardia della sicurezza, della salute e del benessere dei lavoratori.
- ÿ **Coinvolgimento dei lavoratori nella progettazione e nell'implementazione delle tecnologie XR e metaverse.** La consultazione dei lavoratori è un obbligo del datore di lavoro ai sensi della Direttiva quadro sulla salute e sicurezza sul lavoro. Questo è fondamentale in quanto il coinvolgimento dei lavoratori garantisce che la tecnologia sia allineata alle loro esigenze e ai requisiti di salute e sicurezza sul lavoro. Incoraggia il senso di appartenenza e l'impegno verso pratiche sicure e salutari.
- ÿ **Considerazione delle tecnologie XR e metaverse nelle valutazioni dei rischi sul posto di lavoro.** L'uso delle tecnologie XR e metaverse dovrebbe essere integrato nelle valutazioni dei rischi sul posto di lavoro, in conformità con la Direttiva quadro sulla salute e sicurezza sul lavoro. Questa considerazione garantirà che i potenziali rischi associati all'uso di queste tecnologie sul lavoro siano identificati e gestiti in modo efficace, promuovendo un ambiente di lavoro sicuro e sano.

6.2 Raccomandazioni per la ricerca futura

- ÿ **Valutare l'impatto a lungo termine sulla salute dei lavoratori, inclusa la salute mentale.** Condurre studi longitudinali per valutare l'impatto a lungo termine sulla salute dell'uso prolungato e/o ripetitivo di XR in contesti lavorativi, concentrandosi su aspetti fisici come la vista e la postura, nonché aspetti psicosociali come il carico cognitivo e il benessere mentale. Questi studi dovrebbero mirare a basarsi su solidi disegni sperimentali come studi clinici randomizzati controllati. Inoltre, le future attività di ricerca dovrebbero studiare l'impatto degli strumenti XR sulla produttività dei lavoratori, sulla soddisfazione lavorativa e sul morale generale sul posto di lavoro. La comprensione di questi aspetti può aiutare a ottimizzare l'uso di XR per il benessere e l'efficienza dei lavoratori.
- ÿ **Valutare quantitativamente l'efficacia dei programmi di formazione XR.** Indagare l'efficacia dei programmi di formazione ed educazione basati su XR nel migliorare la SSL sul posto di lavoro. Confrontare i metodi di formazione tradizionali con i metodi basati su XR per determinare l'efficacia in termini di fidelizzazione, coinvolgimento e applicazione pratica e valutare quando e come le tecnologie XR dovrebbero

essere utilizzato al meglio per scopi formativi. È importante trovare il giusto equilibrio tra la massimizzazione dei benefici derivanti dall'utilizzo delle tecnologie XR e la mitigazione dei rischi per la salute e la sicurezza sul lavoro associati.

ÿ **Eseguire il monitoraggio della salute e sicurezza sul lavoro in tempo reale.** Studiare come utilizzare al meglio i sensori psicofisiologici, l'intelligenza artificiale e algoritmi all'interno dei dispositivi XR per monitorare in tempo reale gli indicatori di SSL dei lavoratori, come livelli di stress, affaticamento degli occhi e postura, evitando al contempo le insidie della privacy dei dati e dei problemi di sorveglianza dei lavoratori, che, a loro volta, hanno un impatto negativo sulla salute (mentale) dei lavoratori. Ad esempio, è possibile integrare avvisi in tempo reale per sollecitare i lavoratori a modificare la postura, fare pause o interrompere l'utilizzo delle tecnologie XR per un determinato periodo di tempo, in linea con le migliori pratiche in materia di SSL.

ÿ **Ricercare possibilità di standardizzazione delle apparecchiature e dei protocolli XR.** Indagare sulla necessità di supportare lo sviluppo della standardizzazione delle apparecchiature XR e dei protocolli di sicurezza in diversi settori. Questa ricerca dovrebbe mirare a stabilire standard comuni e best practice per l'uso sicuro e salutare delle tecnologie XR.

ÿ **Integrare le considerazioni di SSL nello sviluppo di XR.** Condurre ricerche sugli impatti sui lavoratori e sulla loro SSL e integrare i risultati nella fase di progettazione e sviluppo di XR per fornire tecnologie incentrate sull'uomo. A tal fine, gli esperti di SSL dovrebbero collaborare con gli sviluppatori di tecnologie XR per integrare le considerazioni di SSL nelle fasi iniziali della progettazione del sistema XR. Ciò dovrebbe essere fatto anche consultando gli utenti finali, ovvero i lavoratori che utilizzano queste tecnologie.

6.3 Indicazioni di policy

ÿ **Definire politiche complete in materia di SSL.** Sviluppare e attuare politiche complete in materia di SSL specificamente pensate per le applicazioni XR e metaverse sul posto di lavoro. Tali politiche dovrebbero affrontare i potenziali rischi per la SSL, inclusi quelli fisici, ergonomici e psicosociali, nonché quelli etici e di riservatezza dei dati, e garantire l'uso sicuro, sano ed etico di tali tecnologie.

ÿ **Sostenere la ricerca e lo sviluppo.** Stanziare risorse e finanziamenti per sostenere la ricerca sulla sicurezza e l'usabilità della radiofrequenza e sulle sue implicazioni per la salute e la produttività dei lavoratori. I responsabili politici dovrebbero incoraggiare le partnership tra enti governativi, istituzioni accademiche ed esperti del settore.

ÿ **Creare linee guida per le interazioni nei luoghi di lavoro virtuali.** Elaborare linee guida per regolamentare le interazioni all'interno dei luoghi di lavoro virtuali nel metaverso. Queste dovrebbero coprire aspetti come le molestie virtuali, il comportamento etico e l'impersonificazione di avatar. Le linee guida dovrebbero essere flessibili e adattabili, per stare al passo con una tecnologia in rapida evoluzione e diverse modalità di utilizzo.

ÿ **Gestire programmi di formazione e certificazione.** Promuovere l'introduzione di programmi di formazione e certificazione per l'uso della tecnologia XR, concentrandosi su SSL e buone pratiche. Ciò garantisce che i lavoratori siano adeguatamente preparati a utilizzare queste tecnologie in modo sicuro, sano ed efficace.

ÿ **Garantire un processo decisionale inclusivo.** Coinvolgere un gruppo eterogeneo di stakeholder nel processo decisionale, con competenze multidisciplinari e background diversi, inclusi utenti o lavoratori XR e datori di lavoro, sviluppatori, esperti di SSL e professionisti legali. Ciò garantisce che diversi vengano prese in considerazione prospettive ed esperienze.

ÿ **Valutare l'impatto sul posto di lavoro.** Monitorare e valutare regolarmente l'impatto delle tecnologie XR sulla sicurezza e la salute dei lavoratori per supportare l'elaborazione di politiche e la prevenzione basate sull'evidenza. Ciò è particolarmente importante per lo sviluppo e le applicazioni delle tecnologie XR e del metaverso, poiché le sabbie mobili in quest'area hanno il potenziale di rivelare costantemente nuovi ed emergenti rischi e sfide in materia di SSL.

Riferimenti

- Abdalla, S., Apramian, SS, Cantley, LF, Cullen, MR, Mock, CN, Nugent, R. ... e Smith, KR (2017). Occupazione e rischio di infortuni. In CN Mock, R. Nugent, O. Kobusingye e KR Smith (a cura di), *Priorità per il controllo delle malattie, terza edizione (volume 7): Prevenzione degli infortuni e salute ambientale* (pp. 97-132). Gruppo della Banca Mondiale.
- Abraham, M., Saeghe, P., McGill, M. e Khamis, M. (ottobre 2022). Implicazioni della realtà aumentata su privacy, sicurezza e comportamento: approfondimenti da esperti. In *Nordic Human-Computer Interaction Conference* (articolo 30). Association for Computing Machinery.
- Adebowale, OJ, e Agumba, JN (2022). Applicazioni della realtà aumentata per il miglioramento della produttività nel settore edile: una revisione sistematica. *Ambiente costruito intelligente e sostenibile*, 13(3), 479-495. Disponibile su: <https://doi.org/10.1108/SASBE-06-2022-0128>
- Adhyaru, JS e Kemp, CR (2022). La realtà virtuale come strumento per promuovere il benessere nell' posto di lavoro. *Salute digitale*, 8.
- Ahmed, SF, McDermott, KC, Burge, WK, Ahmed, II, Varma, DK, Liao, YJ, Crandall, AS e Khaderi, SK (2018). Funzione visiva, comportamento digitale e indice di prestazione visiva. *Oftalmologia clinica*, 12, 2553-2561.
- Akçayır, M., & Akçayır, G. (2017). Vantaggi e sfide associati alla realtà aumentata per l'istruzione: una revisione sistematica della letteratura. *Educational Research Review*, 20, 1-11.
- Alam, F., Iqbal, K., Sattar, MZ e Nazir, S. (2020). Utilizzo della realtà aumentata per l'insegnamento della chimica. *Rivista internazionale di apprendimento esperienziale e casi di studio*, 5(2) 226-235. https://www.academia.edu/91241588/Using_Augmented_Reality_for_Teaching_Chemistry?ri=3419
- Al-Gnbri, MK (2022). Contabilità e revisione contabile nel mondo del metaverso da una prospettiva di realtà virtuale: Una ricerca futura. *Journal of Metaverse*, 2(1), 29-41.
- Andreassen, CS (2012). Sviluppo di una scala per la dipendenza da Facebook. *Psychological Reports*, 2012, 110, 2, 501-517.
- Angelov, V., Petkov, E., Shipkovenski, G. e Kalushkov, T. (giugno 2020). Moderni visori per realtà virtuale. *Congresso internazionale sull'interazione uomo-computer, l'ottimizzazione e le applicazioni robotiche (HORA) del 2020* (pp. 1-5). IEEE.
- ANSES. (2021). *Esposizione alle tecnologie di realtà virtuale e/o aumentata. Parere ANSES: Rapporto collettivo di esperti*. Agenzia francese per la sicurezza alimentare, ambientale e del lavoro. Di <https://www.anses.fr/fr/system/files/AP2017SA0076Ra.pdf> Disponibile su: <https://www.anses.fr/fr/system/files/AP2017SA0076Ra.pdf>
- Armougum, A., Orriols, E., Gaston-Bellegarde, A., Marle, CJL e Piolino, P. (2019). Realtà virtuale: un nuovo metodo per studiare il carico cognitivo durante la navigazione. *Journal of Environmental Psychology*, 65, articolo 101338. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2019.101338>
- Atanasoff, LM, e Venable, MA (2017). Tecnostress: implicazioni per gli adulti nel mondo del lavoro. *Career Development Quarterly*, 65, 326-338.
- Babalola, A., Manu, P., Cheung, C., Yunusa-Kaltungo, A. e Bartolo, P. (2023). Una revisione sistematica dell'applicazione delle tecnologie immersive per la gestione della sicurezza e della salute nel settore edile. *Journal of Safety Research*, 85, 66-85.
- Baceviciute, S., Terkildsen, T. e Makransky, G. (2021). Rimediare all'apprendimento da media non immersivi a media immersivi: utilizzare l'EEG per indagare gli effetti dell'integrazione ambientale sulla lettura nella realtà. *Computers & Education*, 164, articolo 104122. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2020.104122>
- Bahaei, SS (2020). Un quadro per la valutazione del rischio nei sistemi socio-tecnici dotati di realtà aumentata. *50a Conferenza Internazionale Annuale IEEE-IFIP su Sistemi e Reti Affidabili - Volume Supplementare (DSN-S) del 2020* (pp. 77-78). IEEE.

- Bale, AS, Ghorpade, N., Hashim, MF, Vaishnav, J. e Almaspoor, Z. (2022). Uno studio completo sul metaverso e il suo impatto sugli esseri umani. *Advances in Human-Computer Interaction*, 2022, articolo 3247060.
- Barreda-Ángeles, M., e Hartmann, T. (2022). Dipendenti dal metaverso? Esplorare la prevalenza della dipendenza dalle applicazioni di realtà virtuale. *Frontiers in Virtual Reality*, 3, Articolo 1031697
- Beyea, D., Ratan, RA, Lei, Y.(., Liu, H., Hales, GE e Lim, C. (2022). Una nuova meta-analisi dell'effetto Proteus: gli studi sulla realtà virtuale rilevano dimensioni dell'effetto più forti. *PRESENCE: Realtà virtuale e aumentata*, 31, 189-202.
- Bérestégui, P. (8 febbraio 2024). *Lavorare nel metaverso: quali sono i rischi?* ETUI, Istituto Sindacale Europeo. <https://www.etui.org/publications/working-metaverse-what-are-risks>
- Bernard, F., Zare, M., Sagot, J.-C. e Paquin, R. (2019). Simulazione di realtà virtuale e valutazione ergonomica nella manutenibilità aeronautica. In S. Bagnara, R. Tartaglia, S. Albolino, T. Alexander e Y. Fujita (a cura di), *Atti del 20° Congresso dell'International Ergonomics Association (IEA 2018)* (Vol. 822, pp. 141-154). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96077-7_15
- Biener, V., Kalamkar, S., Nouri, N., Ofek, E., Pahud, M., Dudley, JJ et al. (2022). Quantificazione degli effetti del lavoro in VR per una settimana. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2206.03189>
- Biocca, F. (1992). La malattia da simulazione rallenterà la diffusione della tecnologia degli ambienti virtuali? *Presenza: Teleoperatori e ambienti virtuali*, 1(3), 334-343.
- Bojić, L. (2022). Il metaverso attraverso il prisma del potere e della dipendenza: cosa succederà quando il mondo virtuale diventerà più attraente della realtà? *European Journal of Futures Research*, 10(1), 1-24.
- Bondanini, G., Giorgi, G., Ariza-Montes, A., Vega-Muñoz, A., & Andreucci-Annunziata, P. (2020). Il lato oscuro della tecnologia sul posto di lavoro: un'analisi scientometrica. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(21), Articolo 8013.
- Bosten, JM, Bosten, JM, Goodbourn, PT, Lawrance-Owen, AJ, Bargary, G., Hogg, RE, & Mollon, JD (2015). Uno studio sulla popolazione della funzione binoculare. *Ricerca sulla visione*, 110, 34-50.
- Bottani, E., & Vignali, G. (2019). Tecnologia della realtà aumentata nell'industria manifatturiera: una revisione dell'ultimo decennio. *Transazioni IISE*, 51(3), 284-310.
- Bourdin, P., Martini, M., & Sanchez-Vives, MV (2019). Il feedback visivo alterato da un avatar incarnato influenza inconsciamente l'ampiezza del movimento e l'attività muscolare. *Scientific Reports*, 9(1).
- Brandon, M. (2024). La cupa realtà delle aggressioni sessuali nel metaverso. Consultato il 20.5.2024 da <https://www.psychologytoday.com/intl/blog/the-future-of-intimacy/202403/sexual-assault-in-the-metaverse>
- Broucke, SV, e Deligiannis, N. (2019). Visualizzazione di dati eterogenei in tempo reale di smart city utilizzando la realtà virtuale. *IEEE International Smart Cities Conference (ISC2) 2019* (pp. 685-690). IEEE.
- Brown, DM, Graham, JD, Innes, KI, Harris, S., Flemington, A. e Bray, SR (2020). Effetti dello sforzo cognitivo precedente sulle prestazioni fisiche: una revisione sistematica e una meta-analisi. *Medicina dello sport*, 50(3), 497-529.
- Büchner, A., Micheli, G., Gottwald, J., Rudolph, L., Pantförder, D., Klinker, G., & Vogel-Heuser, B. (2022, ottobre). Guida alla realtà aumentata incentrata sull'uomo per la manutenzione industriale con gemelli digitali: uno studio pilota basato su casi d'uso. Nel 2022, *IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct (ISMAR-Adjunct)* (pp. 74-76). IEEE.
- Buddhan, AR, Eswaran, SP, Buddhan, DM e Sripurushottama, S. (2019). Sistemi di comando e controllo multimodali basati sulla realtà aumentata per l'industria mineraria. *Procedia Computer Science*, 151, 965-970.
- Caiza, G., Bonilla-Vasconez, P., Garcia, CA, e Garcia, MV (2020). Realtà aumentata per il controllo robotico in contesti di automazione a basso costo e IoT. *25a Conferenza Internazionale IEEE sulle Tecnologie Emergenti e l'Automazione di Fabbrica (ETFA)* (Vol. 1, pp. 1461-1464). IEEE.

- Canbay, Y., Utku, A. e Canbay, P. (2022). Preoccupazioni e misure per la privacy nel metaverso: una revisione. 15a Conferenza Internazionale sulla Sicurezza delle Informazioni e la Crittografia (ISCTURKEY) del 2022. (pp. 80-85). IEEE.
- Caserman, P., Garcia-Agundez, A., Gámez Zerban, A., & Göbel, S. (2021). Cybersickness nei display montati sulla testa per realtà virtuale di ultima generazione: revisione sistematica e prospettive. *Realtà Virtuale*, 25(4), 1153-1170.
- Chang, E., Kim, HT e Yoo, B. (2020). Malattia da realtà virtuale: una revisione delle cause e delle misurazioni. *Rivista internazionale di interazione uomo-computer*, 36(17), 1658-1682.
- Chellappa, V., Mésároš, P., Špak, M., Spišáková, M., & Kaleja, P. (2022). Ricerca sulla formazione sulla sicurezza basata sulla realtà virtuale nel settore edile. Nella *serie di conferenze IOP: Scienza e ingegneria dei materiali* (vol. 1252, Articolo 012058). Pubblicazione IOP.
- Chen, Y., Huang, D., Liu, Z., Osmani, M. e Demian, P. (2022). Edilizia 4.0, Industria 4.0 e modellazione delle informazioni edilizie (BIM) per lo sviluppo edilizio sostenibile nella smart city. *Sostenibilità*, 14(16), Articolo 10028.
- Cheng, H., Liu, Z., Cai, F., Zhang, L., Ma, X., Sun, X., Hu, J. e Wang, P. (2022). Tecnologia AR nella progettazione di superfici per giacimenti di petrolio e gas: applicazioni e prospettive. *Wearable Technology*, 3(2), 23-31. <https://doi.org/10.54517/wt.v3i2.1641>
- Cheng, R., Wu, N., Varvello, M., Chen, S. e Han, B. (2022). Siamo pronti per il metaverso?: Uno studio di misurazione delle piattaforme di realtà virtuale sociale. In *Atti della 22a ACM Internet Measurement Conference* (pp. 504-518). Association for Computing Machinery.
- Cheong, BC (2022). Avatar nel metaverso: potenziali questioni legali e rimedi. *International Cybersecurity Law Review*, 3(2), 467-494.
- Chihara, T. e Seo, A. (2018). Valutazione del carico di lavoro fisico influenzato dalla massa e dal baricentro del visore. *Ergonomia applicata*, 68, 204-212.
- Chuah, SH-W. (13 dicembre 2018). Perché e chi adatterà la tecnologia della realtà estesa? Revisione della letteratura, sintesi e programma di ricerca futura. Disponibile su SSRN: <https://doi.org/10.2139/ssrn.3300469>
- Clement, D. (2 giugno 2022). Sesso nel metaverso: corpo virtuale, violenza sessuale reale. The Law Association Inc. Consultato il 20.5.2024 da <https://thelawassociation.nz/sex-in-the-metaverse-virtual-body-real-sexual-assault/>
- Cougnard-Gregoire, A., Merle, BM, Aslam, T., Seddon, JM, Akin, I., Klaver, CC, ... e Delcourt, C. (2023). Esposizione alla luce blu: rischi oculari e prevenzione: una revisione narrativa. *Oftalmologia e terapia*, 12(2), 755-788.
- Cranford, M. (1996). La traiettoria sociale della realtà virtuale: etica sostanziale in un mondo senza vincoli. *Tecnologia nella società*, 18(1), 79-92.
- Creel, B., Rinz-Jones, CJ, Jones, A. e Jackson, CR (2020). *Carica batterica dei visori per realtà virtuale*. Atti del 26° Simposio ACM su software e tecnologie per la realtà virtuale.
- Daling, LM, Kommetter, C., Abdelrazeq, A., Ebner, M., & Ebner, M. (2020). Libri sulla realtà mista: applicazione della realtà aumentata e virtuale nella formazione in ingegneria mineraria. In V. Geroimenko (a cura di), *Realtà aumentata nell'istruzione: una nuova tecnologia per l'insegnamento e l'apprendimento* (pp. 185-186) . 195). Springer.
- Dam, VAT, Dao, NG, Nguyen, DC, Vu, TMT, Boyer, L., Auquier, P., Fond, G., Ho, RCM, Ho, CSH e Zhang, MWB (2023). Qualità della vita e salute mentale degli adolescenti: relazioni con la dipendenza dai social media, la paura di essere tagliati fuori e lo stress associato alla negligenza e alle reazioni negative dei coetanei online. *PloS one*, 18(6), e0286766. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0286766>
- De Felice, F., Rehman, M., Petrillo, A., & Baffo, I. (2023). Un metamondo: implicazioni, opportunità e rischi del metaverso. *IET Collaborative Intelligent Manufacturing*, 5(3), Articolo e12079.

- Dehdashti, A., Mehralizadeh, S. e Mahjoubi, Z. (2017). Stress sul posto di lavoro e disturbi muscoloscheletrici tra gli infermieri: uno studio trasversale. *Middle East Journal of Rehabilitation and Health Studies*, 4(3).
- Denning, T., Dehlawi, Z. e Kohno, T. (2014). In situ con gli spettatori di occhiali per realtà aumentata: prospettive sulle tecnologie di registrazione e di mediazione della privacy. In *Atti della 32a Conferenza Annuale ACM sui Fattori Umani nei Sistemi Informativi—CHI'14* (pp. 2377-2386). Associazione per i macchinari informatici.
- Derby, JL, Mello, SM, Horn, NR, StClair, AN, e Chaparro, BS (2023). Esame dell'inclusività della realtà estesa (XR) nei prodotti attuali. *Atti del convegno annuale della Human Factors and Ergonomics Society*, 67(1), 2198-2204.
- Descheneaux, CR, Reinerman-Jones, L., Moss, JD, Krum, DM, e Hudson, IL (2020). Effetti negativi associati agli HMD nella realtà aumentata e virtuale. In *Realtà Virtuale, Aumentata e Mista. Design e Interazione: 12a Conferenza Internazionale, VAMR 2020, Atti, Parte I 22* (pp. 410-428). Springer International Publishing.
- Dick, E. (1 giugno 2021). *Usi attuali e potenziali di AR/VR per l'equità e l'inclusione*. Information Technology and Innovation Foundation. <https://itif.org/publications/2021/06/01/current-and-potential-uses-arvr-equity-and-inclusion/>
- Dickinson, P., Jones, A., Christian, W., Westerside, A., Mulloy, F., Gerling, KM, Hicks, K., Wilson, L. e Parke, A. (2021). Sperimentare confronti simulati in realtà virtuale. In *Atti della Conferenza CHI 2021 sui fattori umani nei sistemi informatici* (articolo 255). Association for Computing Machinery.
- Ding, X., Sun, M., Bai, W. e Li, X. (2022). Esplorazione della progettazione architettonica nella modalità di co-costruzione tra utente e progettista nell'ambiente del metaverso. Negli *Atti del 7° Congresso del 2022. Conferenza internazionale su sistemi, controllo e comunicazioni* (pp. 55-60). Association for Computing Machinery.
- Dolata, M., & Schwabe, G. (2023). Cos'è il metaverso e chi cerca di definirlo? Mappare il sito della costruzione sociale. *Journal of Information Technology*, 38(3), 239-266.
- Duarte, J., Dinis, MD, e Baptista, JS (2019). Applicazioni della realtà virtuale nell'industria estrattiva: una breve rassegna. In *Studies in Systems, Decision and Control* (pp. 53-60). Springer International Publishing.
- Duarte, J., Torres Marques, A., e Santos Baptista, J. (2021). Incidenti sul lavoro correlati a macchinari pesanti: una revisione sistematica. *Sicurezza*, 7(1), Articolo 21. <https://doi.org/10.3390/safety7010021>
- Duncan, R. (2015). Il potenziale contributo della realtà aumentata e virtuale all'industria petrolifera e del gas. *Rivista internazionale di gestione*, 2(3), 112-120. <https://doi.org/10.18646/2056.23.15-011>
- Duymańska, N., Strojny, P., & Strojny, A. (2018). È possibile evitare la malattia da simulatore? Una recensione su aspetti temporali della malattia da simulatore. *Frontiers in Psychology*, 9, Articolo 410742.
- Dwivedi, YK, Ismagilova, E., Hughes, DL, Carlson, J., Filieri, R., Jacobson, J., Jain, V., Karjaluo, H., Kefi, H., Krishen, AS, Kumar, V., Rahman, MM, Raman, R., Rauschnabel, PA, Rowley, JE, Salo, JT, Tran, GA, e Wang, Y. (2021). Definire il futuro della ricerca di marketing sui social media e sui media digitali: prospettive e proposte di ricerca. *International Journal of Information Management*, 59, articolo 102168.
- Dwivedi, YK, Kshetri, N., Hughes, L., Rana, NP, Baabdullah, AM, Kar, AK, Koohang, A., Ribeiro-Navarrete, S., Belei, N., Balakrishnan, J., Basu, S., Behl, A., Davies, GH, Dutot, V., Dutot, R. Evans, R. Evans. Felix, R., Foster-Fletcher, R., Giannakis, M. ... Yan, M. (2023). Esplorando il darkverse: un'analisi multi-prospettiva degli impatti sociali negativi del metaverso. *Frontiere dei sistemi informativi*, 25(5), 2071-2114.
- Easa, S. (2021). Considerazioni sul fattore umano nella realtà virtuale: adeguate o inadeguate? *Ergonomics International Journal*, 5(2), 1-11.
- Ellis, SR (1994). Cosa sono gli ambienti virtuali? *IEEE Computer Graphics and Applications*, 14(1), 17-22.

- Erickson, A., Kim, K., Bruder, G. e Welch, G. (2020). Effetti della grafica in modalità scura sull'acuità visiva e sull'affaticamento con i display montati sulla testa per la realtà virtuale. *Conferenza IEEE 2020 sulla realtà virtuale e le interfacce utente 3D (VR)* (pp. 434-442). IEEE.
- EU-OSHA – Agenzia europea per la sicurezza e la salute sul lavoro, *Previsioni sui rischi nuovi ed emergenti per la sicurezza e la salute sul lavoro associati alla digitalizzazione entro il 2025*, 2018. Disponibile all'indirizzo: <https://osha.europa.eu/it/publicazioni/foresight-nuovi-e-emergenti-rischi-associati-alla-sicurezza-e-alla-salute-occupazionale>
- EU-OSHA – Agenzia europea per la sicurezza e la salute sul lavoro, *Intelligenza artificiale per la gestione dei lavoratori: implicazioni per la sicurezza e la salute sul lavoro*, 2022a. Disponibile all'indirizzo: <https://osha.europa.eu/it/publicazioni/intelligenza-artificiale-implicazioni-sulla-gestione-dei-lavoratori-sicurezza-e-salute-occupazionale>
- EU-OSHA – Agenzia europea per la sicurezza e la salute sul lavoro, *Integrare la sicurezza e la salute sul lavoro nella valutazione dei rischi per la sicurezza informatica*, 2022b. Disponibile all'indirizzo: <https://osha.europa.eu/en/publications/incorporating-occupational-safety-and-health-assessment-cybersecurity-risks>
- EU-OSHA – Agenzia europea per la sicurezza e la salute sul lavoro, *Sistemi di monitoraggio digitale intelligenti per la sicurezza e la salute sul lavoro: opportunità e sfide*. 2023a. Disponibile all'indirizzo: <https://osha.europa.eu/en/publications/smart-digital-monitoring-systems-occupational-safety-and-health-opportunities-and-challenges>
- EU-OSHA – Agenzia europea per la sicurezza e la salute sul lavoro, *Sistemi di monitoraggio digitale intelligenti per la sicurezza e la salute sul lavoro: usi e sfide*, 2023b. Disponibile all'indirizzo: <https://osha.europa.eu/it/publicazioni/sistemi-di-monitoraggio-digitali-intelligenti-sicurezza-e-salute-occupazionale-usi-e-sfide>
- EU-OSHA – Agenzia europea per la sicurezza e la salute sul lavoro, *Sorveglianza e monitoraggio dei lavoratori a distanza: implicazioni per la sicurezza e la salute sul lavoro*, 2023c. <https://healthy-workplaces.osha.europa.eu/en/publications/surveillance-and-monitoring-remote-workers-implications-occupational-safety-and-health-0>
- Fang, W., Chen, L., Zhang, T., Chen, C., Teng, Z. e Wang, L. (2023). Realtà aumentata con display montati sulla testa nella produzione: una revisione sistematica. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 83, articolo 102567.
- Farshid, M., Paschen, J., Eriksson, T. e Kietzmann, J. (2018). Vai audacemente!: Esplora la realtà aumentata (AR), la realtà virtuale (VR) e la realtà mista (MR) per il business. *Business Horizons*, 61(5), 657-663.
- Filho, J., Freitas, CM e Nedel, LP (2018). VirtualDesk: un ambiente immersivo comodo ed efficiente approccio alla visualizzazione delle informazioni. *Computer Graphics Forum*, 37(3), 415-426.
- Filho, J., Freitas, CM e Nedel, L. (2019a). Analisi immersiva confortevole con la metafora del virtualdesk. *IEEE computer grafica e applicazioni*, 39(3), 41-53.
- Filho, J., Stuerzlinger, W. e Nedel, LP (2019b). Valutazione di una geovisualizzazione immersiva del cubo spazio-temporale per l'esplorazione intuitiva dei dati di traiettoria. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 26(1), 514-524.
- Flavián, C., Ibáñez-Sánchez, S., e Orús, C. (2019). L'impatto delle tecnologie di realtà virtuale, aumentata e mista sull'esperienza del cliente. *Journal of Business Research*, 100, 547-560. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2018.10.050>
- Ford, PJ (2001). Un'ulteriore analisi dell'etica della rappresentazione nella realtà virtuale: ambienti multiutente. *Etica e tecnologia dell'informazione*, 3(2), 113-121.
- Foster, P. e Burton, A. (2004). La realtà virtuale nel miglioramento dell'ergonomia mineraria. *Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, 104(2), 129-133.
- Fuchs, P. (2017). *Visori per realtà virtuale: un approccio teorico e pragmatico*. CRC Press.
- Gallagher, M., & Ferrè, ER (2018). Cybersickness: una prospettiva di integrazione multisensoriale. *Ricerca multisensoriale*, 31(7), 645-674.

- Garrido, LE, Frias-Hiciano, M., Moreno-Jimenez, MD, Cruz, GN, Garcia-Batista, ZE, Guerra-Peña, K. e Medrano, LA (2021). Concentrandosi sulla cybersickness: pervasività, traiettorie latenti, suscettibilità ed effetti sull'esperienza di realtà virtuale. *Realtà virtuale*, 26(4), 1347-1371.
- Geiger, A., Bewersdorf, I., Brandenburg, E., e Stark, R. (2018). Feedback visivo per la comprensione in ambienti di realtà virtuale per un'interfaccia che istruisce modelli umani digitali. In T. Ahram, e C. Falcão (a cura di), *Advances in usability and user experience: Proceedings of the AHFE 2017 International Conference on Usability and User Experience* (pp. 228-239). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-60492-3_22
- Gooskens, G. (2010). Lo status etico delle azioni virtuali. *Ethical Perspectives*, 17(1), 59-78.
- GOV.UK. (2020) *La sicurezza dei sistemi di realtà virtuale domestici: una revisione della letteratura*. Documento di ricerca BEIS 2020/038, Dipartimento per le imprese, l'energia e la strategia industriale. <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5f763502d3bf7f7c2bcf9eb9/safety-domestic-vr-systems.pdf>
- Grassini, A., & Jankowski, J. (2015). Addestramento di piloti basato sulla realtà virtuale per minatori di carbone sotterranei. *Scienza della sicurezza*, 72, 310-314.
- Grassini, S. e Laumann, K. (2020a). I moderni visori VR sono sessisti? Una revisione sistematica sulle differenze di genere nella realtà virtuale mediata dai visori VR. *Frontiers in Psychology*, 11, 545946.
- Grassini, S. e Laumann, K. (2020b). Valutazione dell'uso della realtà virtuale nella sicurezza sul lavoro: una revisione della letteratura. In P. Baraldi, F. Di Maio e E. Zio (a cura di), *Atti della 30a Conferenza Europea sulla Sicurezza e l'Affidabilità e della 15a Conferenza sulla Valutazione e la Gestione Probabilistica della Sicurezza* (pp. 4964-4971). Research Publishing, Singapore.
- Grassini, S. e Laumann, K. (2021). Tecnologie visive immersive e salute umana. In *Atti della 32a Conferenza Europea sull'Ergonomia Cognitiva* (Articolo 6). Association for Computing Machinery.
- Grassini, S., Laumann, K. e Luzi, AK (2020). Associazione di fattori individuali con la cinetosi e il senso di presenza nella realtà virtuale mediata dai display montati sulla testa (HMD). *Tecnologie multimodali e interazione*, 5(3), articolo 7.
- Grassini, S., Laumann, K., de Martin Topranin, V., & Thorp, S. (2021). Valutazione dell'effetto delle stimolazioni multisensoriali sulla nausea da simulatore e sul senso di presenza durante l'esperienza VR mediata da HMD. *Ergonomics*, 64(12), 1532-1542.
- Greenwald, W. (30 ottobre 2023). *Meta Quest 3 vs. Meta Quest 2: quali sono le differenze e quale visore VR è migliore?* PCMag. <https://uk.pcmag.com/comparison/149395/meta-quest-3-vs-meta-quest-2-whats-different-and-which-vr-headset-is-better>
- Guo, Z., Zhou, D., Zhou, Q., Zhang, X., Geng, J., Zeng, S., Lv, C. e Hao, A. (2020). Applicazioni della realtà virtuale nella manutenzione durante il ciclo di vita dei prodotti industriali: una revisione sistematica. *Journal of Manufacturing Systems*, 56, 525-538.
- Haleem, A., Javaid, M., Qadri, MA, & Suman, R. (2022). Comprendere il ruolo delle tecnologie digitali nell'istruzione: una revisione. *Operazioni sostenibili e computer*, 3, 275-285.
- Hamad, A. e Jia, B. (2022). Come la tecnologia della realtà virtuale ha cambiato le nostre vite: una panoramica delle applicazioni e dei limiti attuali e potenziali. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(18), articolo 11278.
- Hampton, KN, Sessions, LF, Her, EJ e Rainie, L. (2009). Isolamento sociale e nuove tecnologie. Recuperato il 20.5.2024 da: <https://www.site.uottawa.ca/~stan/csi2911/Pew.pdf>
- Heo, J., Kim, K., Fava, M., Mischoulon, D., Papakostas, GI, Kim, M., Kim, DJ, Chang, KJ, Oh, Y., Yu, BH e Jeon, HJ (2017). Effetti dell'uso dello smartphone con e senza luce blu di notte in adulti sani: uno studio randomizzato, in doppio cieco, cross-over, controllato con placebo. *Rivista di ricerca psichiatrica*, 87, 61-70.
- Hess, RF, To, L., Zhou, J., Wang, G., & Cooperstock, JR (2015). Visione stereoscopica: chi ha e chi ha-nots. *i-Perception*, 6(3), 2041669515593028.

- Hew, KF e Cheung, WS (2010). Utilizzo di mondi virtuali immersivi tridimensionali (3D) in contesti di istruzione K-12 e superiore: una revisione della ricerca. *British Journal of Educational Technology*, 41(1), 33-55.
- Hibbard, PB, van Dam, LC e Scarfe, P. (2020). Le implicazioni della variabilità della distanza interpupillare per la realtà virtuale. *Conferenza internazionale sull'immersione 3D (IC3D) del 2020* (pp. 1-7). IEEE.
- Hine, E., Neroni Rezende, I., Roberts, H., Wong, D., Taddeo, M., & Floridi, L. (2023). Sicurezza e privacy nella realtà estesa immersiva: un'analisi e raccomandazioni politiche. *SSRN Electronic Journal*, 1(1), 1-44. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4585963>
- Hodges, LF e Davis, ET (1993). Considerazioni geometriche per ambienti virtuali stereoscopici. *Presenza: Teleoperatori e ambienti virtuali*, 2(1), 34-43.
- Hoyer, WD, Kroschke, M., Schmitt, BH, Kraume, K. e Shankar, V. (2020). Trasformare l'esperienza del cliente attraverso le nuove tecnologie. *Journal of Interactive Marketing*, 51(1), 57-71.
- Hussain, Z., Khan, A. e Ali, A. (2023). L'impatto dei contenuti generati dagli utenti, delle interazioni sociali e delle economie virtuali sugli ambienti del metaverso. *Journal of Sustainable Economics*, 1(2), 34-44.
- Ito, K., Tada, M., Ujike, H. e Hyodo, K. (2021). Effetti del peso e dell'equilibrio dei display montati sulla testa sul carico fisico. *Scienze applicate*, 11(15), Articolo 6802.
- Jampeisov, Z. (2019). Utilizzo della tecnologia della realtà virtuale nell'industria petrolifera e del gas. *International Journal of Engineering and Management Research*, 9(2), 124-127.
- Johansson, M., & Roupé, M. (2024). Applicazioni concrete del BIM e della realtà virtuale immersiva nel settore edile. *Automazione nell'edilizia*, 158, articolo 105233.
- Kaufeld, M., Mundt, M., Forst, S. e Hecht, H. (2022). La realtà aumentata ottica trasparente può indurre cinetosi grave. *Display*, 74, Articolo 102283.
- Keller, BN, Lonczynski, JP, D'Angelo, T. e Delabrida, SE (2018). Valutazione di dispositivi indossabili per l'ispezione di nastri trasportatori mediante realtà aumentata. In *Atti del 17° Simposio brasiliano sui fattori umani nei sistemi informatici* (articolo 23). Association for Computing Machinery.
- Kennedy, RS, Lane, NE, Berbaum, KS e Lilienthal, MG (1993). Questionario sulla nausea da simulatore: un metodo avanzato per quantificare la nausea da simulatore. *The International Journal of Aviation Psychology*, 3(3), 203-220.
- Khan, B. (2023). *Emersione del tecnostress negli ambienti VR multiutente per scopi lavorativi* [Tesi di laurea magistrale, Facoltà di Management e Economia, Università di Tampere]. Trepo. <https://trepo.tuni.fi/handle/10024/151182>
- Kim, E. e Shin, G. (2018). Rotazione della testa e attività muscolare durante l'esecuzione di attività di editing di documenti con un visore auricolare. *Atti del convegno annuale della Human Factors and Ergonomics Society*, 62(1), 952-955.
- Kim, H., Kim, DJ, Chung, W., Park, K., Kim, JD, Kim, D., Kim, K. e Jeon, HJ (2021). Fattori predittivi clinici di cybersickness nella realtà virtuale (VR) tra persone altamente stressate. *Scientific Reports*, 11(1), Articolo 12139.
- Kim, J. e Irizarry, J. (2020). Valutazione dell'uso della tecnologia della realtà aumentata per migliorare le competenze spaziali degli studenti di gestione delle costruzioni. *International Journal of Construction Education and Research*, 17(2), 99-116.
- Kim, J. e Renfroe, J. (2022). Formazione della forza lavoro nel settore edile assistita dalla realtà aumentata. *8a Conferenza Internazionale dell'Immersive Learning Research Network (iLRN) del 2022* (pp. 1-6). IEEE.
- Kim, J., Kim, S. e So, G. (2016). La modellazione dell'affaticamento del colore nei video stereoscopici tridimensionali. *Rivista internazionale di teoria e ingegneria informatica*, 8(3), 229-234.

- Kim, K. e Hwang, Y. (2017). L'utilità della realtà aumentata sui display head-up dei veicoli. In N. Stanton, S. Landry, G. Di Bucchianico e A. Vallicelli (a cura di), *Progressi negli aspetti umani del trasporto: Atti della conferenza internazionale AHFE 2016 sui fattori umani nei trasporti* (pp. 655-662). *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 484. Springer.
- Kim, YM, Rhiu, I., & Yun, MH (2020). Una revisione sistematica di un sistema di realtà virtuale dal punto di vista dell'esperienza utente. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 36(10), 893-910.
- Kim, YY, Kim, HJ, Kim, EN, Ko, HD e Kim, HT (2005). Cambiamenti caratteristici nei componenti fisiologiche della cybersickness. *Psicofisiologia*, 42(5), 616-625.
- Kiziroglou, ME, Boyle, DE, Yeatman, EM e Cilliers, JJ (2017). Opportunità per i sistemi di rilevamento nel settore minerario. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 13(1), 278-286.
- Klier, C. e Buratto, LG (2020). Stress e recupero della memoria a lungo termine: una revisione sistematica. *Tendenze in Psichiatria e Psicoterapia*, 42(3), 284-291.
- Konstantinidis, F.K., Kansizoglou, I., Santavas, N., Mouroutsos, S.G., & Gasteratos, A. (2020). MARMA: un assistente di manutenzione mobile basato sulla realtà aumentata per procedure di riparazione rapide nel contesto dell'Industria 4.0. *Macchine*, 8(4), Articolo 88.
- Koohestani, A., Nahavandi, D., Asadi, H., Kebria, P., Khosravi, A., Alizadehsani, R., & Nahavandi, S. (2019). Una scoperta di conoscenza nella cinetosi: una revisione completa della letteratura. *Accesso IEEE*, 7, 85755-85770.
- Koteleva, N., Buslaev, G., Valnev, V. e Kunshin, A. (2020). Sistema di realtà aumentata e manutenzione delle pompe petrolifere. *International Journal of Engineering*, 33(8), 1620-1628.
- Koteleva, N., Valnev, V. e Frenkel, I. (2021). Studio dell'efficacia della collaborazione tra realtà aumentata e sistema di simulazione dinamica nella manutenzione delle pompe petrolifere. *Scienze Applicate*, 12(1), Articolo 350.
- Kourtesis, P., Collina, S., Dumas, LA, e MacPherson, SE (2019). Validazione del questionario di neuroscienza in realtà virtuale: durata massima delle sessioni di realtà virtuale immersiva senza la presenza di sintomatologia avversa pertinente. *Frontiers in Human Neuroscience*, 13, Articolo 417.
- Kweon, SH, Kweon, HJ, Kim, SJ, Li, X., Liu, X. e Kweon, HL (2017). Una ricerca sulle onde cerebrali nell'uso della realtà virtuale: confronto tra VR e video 2D nella misurazione EEG. In *Progressi nell'interazione tra fattori umani e sistemi: Atti della conferenza internazionale AHFE 2017 sull'interazione tra fattori umani e sistemi* (pp. 194-203). Springer International Publishing.
- Laato, S., Xi, N., Spors, V., Thibault, M. e Hamari, J. (2024). Dare un senso alla realtà: una mappatura della terminologia relativa alla realtà virtuale, alla realtà aumentata, alla realtà mista, alla XR e al metaverso. Negli *Atti della 57a Conferenza Internazionale delle Hawaii sulle Scienze dei Sistemi* (pp. 6625-6634).
- Lambooj, MM, IJsselsteijn, WW, Fortuin, MM e Heynderickx, II (2009). Disagio visivo e affaticamento visivo dei display stereoscopici: una revisione. *Journal of Imaging Science and Technology*, 53, 1-14.
- Lang, B. (6 aprile 2017). *I nuovi HTC Vive pesano il 15% in meno rispetto al lancio*. Road to VR. <https://www.roadtovr.com/htc-vive-weight-15-percent-lighter-than-original-headset-vs-oculus-rift-comparison>
- Lawrenson, JG, Hull, CC, e Downie, LE (2017). L'effetto delle lenti per occhiali che bloccano la luce blu sulle prestazioni visive, sulla salute maculare e sul ciclo sonno-veglia: una revisione sistematica della letteratura. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 37, pp. 644-654.
- LeBlanc, VR (2009). Gli effetti dello stress acuto sulle prestazioni: implicazioni per le professioni sanitarie istruite. *Medicina accademica*, 84(10), S25-S33.
- Leppink, J. (2017). Teoria del carico cognitivo: implicazioni pratiche e una sfida importante. *Journal of Scienze mediche dell'Università di Taibah*, 12(5), 385-391.

- Li, G., Rempel, DM, Liu, Y. e Harris-Adamson, C. (2020). Progettazione e assegnazione di microgesti ai comandi per *attività di realtà virtuale e aumentata*. *Atti del convegno annuale della Human Factors and Ergonomics Society*, 64(1), 2061-2063.
- Luger, T., Bosch, T., Veeger, D., & de Looze, M. (2014). L'influenza della variazione del compito sulla manifestazione della fatica è ambigua – Una revisione della letteratura. *Ergonomics*, 57(2), 162-174.
- Lukosch, S., Billingham, M., Alem, L. e Kiyokawa, K. (2015). Collaborazione nella realtà aumentata. *Lavoro cooperativo supportato dal computer*, 24, 515-525.
- Luo, N., Wang, X., Van, F., Ye, ZC e Qian, F. (2015). Piattaforma di simulazione integrata di processi chimici basata su realtà virtuale e modello dinamico. *Ingegneria chimica assistita da computer*, 37, 581-586.
- Mahapatra, M., e Pillai, R. (2018). Tecnostress nelle organizzazioni: una revisione della letteratura. *Ricerca Documenti*, 99.
- Makransky, G., Terkildsen, TS, e Mayer, RE (2019). L'aggiunta di realtà virtuale immersiva a una simulazione di laboratorio scientifico aumenta la presenza ma riduce l'apprendimento. *Learning and Instruction*, 60, pp. 225-236. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2017.12.007>
- Manjrekar, S., Sandilya, S., Bhosale, D., Kanchi, S., Pitkar, A. e Gondhalekar, M. (2014). CAVE: Una tecnologia immersiva emergente - Una revisione. Nel *2014 UKsim-AMSS 16a Conferenza Internazionale sulla Modellazione e Simulazione al Computer* (pp. 131-136). IEEE.
- Marklin, RW, Toll, AM, Bauman, E., Simmins, JJ, Ladisa, JF e Cooper, R. (2020). I dispositivi di realtà aumentata montati sulla testa influenzano l'attività muscolare e l'affaticamento degli occhi degli operatori dei servizi pubblici che svolgono lavori procedurali? Studi su operatori e addetti ai tombini. *Human Factors*, 64(2), 305-323.
- Marzoli, F., Bortolami, A., Pezzuto, A., Mazzetto, E., Piro, R., Terregino, C., Bonfante, F., & Belluco, S. (2021). Una revisione sistematica della sopravvivenza dei coronavirus umani sulle superfici ambientali. *Scienza dell'ambiente totale*, 778, articolo 146191.
- Merbah, J., Gorce, P. e Jacquier-Bret, J. (2020). Effetti dell'illuminazione ambientale e delle impostazioni di luminosità dello schermo sui parametri degli arti superiori e dello scheletro assiale: come adattano le posture gli utenti? *Ergonomia*, 63(12), 1561-1570.
- Mittelstädt, JM, Wacker, J. e Stelling, D. (2018). Effetti collaterali della realtà virtuale e relazione tra cybersickness e prestazioni cognitive. *Realtà virtuale*, 23, 143-154.
- Monteiro, P., Gonçalves, G., Coelho, H., Melo, M. e Bessa, M. (2021). Interazione a mani libere nella realtà virtuale immersiva: una revisione sistematica. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 27(5), 2702-2713.
- Moore, N., Dempsey, K., Hockey, P., Jain, S., Poronnik, P., Shaban, RZ e Ahmadpour, N. (2021). Innovazione durante una pandemia: sviluppo di linee guida per la prevenzione e il controllo delle infezioni a supporto dell'istruzione attraverso la realtà virtuale. *Frontiers in Digital Health*, 3, articolo 628452.
- Mourtzis, D., Zogopoulos, V., Katagis, I. e Lagios, P. (2018). Visualizzazione basata sulla realtà aumentata delle istruzioni CAM verso il paradigma Industria 4.0: uno studio di caso su una macchina piegatrice CNC. *Procedia CIRP*, 70, pp. 368-373.
- Mullen, G. e Davidenko, N. (2021). Compressione temporale nella realtà virtuale. *Tempistica e percezione del tempo*, 9(4), 377-392.
- Németh, J., Tapasztó, B., Aclimandos, W., Kestelyn, PG, Jonas, J.B., de Faber, J.T., Janulevičienė, I., Grzybowski, A., Nagy, Z.Z., Pärssinen, O., Guggenheim, J.A., Allen, P.M., Baraas, F.R.C. Gray, LS, Polling, JR, Haarman, AE ... Resnikoff, S. (2021). Aggiornamenti e linee guida sulla gestione della miopia. Società Europea di Oftalmologia in collaborazione con l'International Myopia Institute. *European Journal of Ophthalmology*, 31, 853-883.
- Nichols, S. (1999). Ergonomia fisica dell'uso dell'ambiente virtuale. *Ergonomia applicata*, 30(1), 79-90.

- O'Broljain, F., Jacquemard, T., Monaghan, D.S., O'Connor, N.E., Novitzky, P., & Gordijn, B. (2015). La convergenza tra realtà virtuale e social network: minacce alla privacy e all'autonomia. *Etica della scienza e dell'ingegneria*, 22, 1-29.
- Oh, H., & Son, W. (2022). Cybersickness e la sua gravità derivante dai contenuti di realtà virtuale: uno studio completo. *Sensors (Basilea, Svizzera)*, 22(4), Articolo 1314.
- Orru, G. e Longo, L. (2018). L'evoluzione della teoria del carico cognitivo e la misurazione dei suoi carichi intrinseci, estranei e pertinenti: una revisione. In *Human Mental Workload: Models and Applications: Second International Symposium, H-WORKLOAD 2018, Revised Selected Papers 2* (pp. 23-48). Springer International Publishing.
- OSHA.gov (20 giugno 2019). *Prevenzione di incendi e/o esplosioni causati da piccoli dispositivi indossabili alimentati da batterie al litio* [Bollettino informativo e sulla sicurezza]. <https://www.osha.gov/sites/default/files/publications/shib011819.pdf>
- Owens, ME, e Beidel, DC (2015). La realtà virtuale può efficacemente evocare il disagio associato al disturbo d'ansia sociale? *Journal of Psychopathology and Behavioral Assessment*, 37, 296-305.
- Palmarini, R., Erkoyuncu, JA, Roy, R., e Torabmostaedi, H. (2018). Una revisione sistematica delle applicazioni di realtà aumentata nella manutenzione. *Robotica e produzione integrata al computer*, 49, 215-228.
- Parker, AJ (2016). La visione nel nostro mondo tridimensionale. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Scienze biologiche*, 371(1697), Articolo 20150251.
- Patterson, RE (2015). Fondamenti della visione binoculare umana. In RE Patterson (a cura di), *Fattori umani nei display 3D stereoscopici* (pp. 9-21). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-6651-1_2
- Paul, G. e Briceno, L. (2021). Un quadro concettuale di fattori abilitanti DHM per l'ergonomia 4.0. In *Atti del 21° Congresso dell'International Ergonomics Association (IEA 2021) Volume V: Metodi e approcci 21* (pp. 403-406). Springer International Publishing.
- Peña, J., Craig, M. e Baumhardt, H. (2022). Gli effetti della personalizzazione dell'avatar e della percezione virtuale della mente umana: un test che utilizza il paradigma di Milgram. *New Media & Society*, 0(0). <https://doi.org/10.1177/14614448221127258>
- Porta, CM, Frerich, EA, Hoffman, S., Bauer, S., Jain, VM, & Bradley, C. (2024). Violenza sessuale nella realtà virtuale: una revisione di scoping. *Journal of Forensic Nursing*, 20(1), 66-77.
- Ramadan, MZ e Alhaag, MH (2018). Valutazione dello stress fisico dell'utente associato alla visione di display 3D e 2D per periodi di tempo prolungati, utilizzando la variabilità della frequenza cardiaca, la resistenza galvanica della pelle e la misurazione delle prestazioni. *Journal of Sensors*, 2018, articolo 2632157.
- Rauschnabel, PA, Felix, R., Hinsch, C., Shahab, H. e Alt, F. (2022). Cos'è la XR? Verso un framework per la realtà aumentata e virtuale. *Computers in Human Behavior*, 133, Articolo 107289.
- Rauschnabel, PA, He, J., & Ro, YK (2018). Precedenti all'adozione della realtà aumentata intelligente occhiali: uno sguardo più da vicino ai rischi per la privacy. *Journal of Business Research*, 92, 374-384.
- Reason, JT, e Brand, JJ (1975). *Mal di movimento*. Academic Press.
- Rivera, ML, Mora-Serrano, J., e Oñate, E. (2024). Una revisione critica di come la Realtà Estesa (XR) abbia affrontato i fattori chiave che influenzano la sicurezza nei progetti di costruzione (fSCP). *Archives of Computational Methods in Engineering*, 31, 2015-2048.
- Roberts, SC, Havill, NL, Flores, RM, Hendrix II, CA, Williams, MJ, Feinn, RS ... Murray, T. S. (2022). Disinfezione dei dispositivi di realtà virtuale in ambito sanitario: valutazione in vitro e studio di indagine. *Journal of Medical Internet Research*, 24(12), Articolo e42332.
- Sabelman, E., & Lam, R. (2015). I pericoli reali della realtà aumentata. *IEEE Spectrum*, 52(7), 48-53.
- Saghafian, M., Sitompul, TA, Laumann, K., Sundnes, K. e Lindell, R. (2021). Applicazione dei fattori umani nel processo di sviluppo delle tecnologie visive immersive: sfide e miglioramenti futuri. *Frontiers in Psychology*, 12, articolo 634352.

- Salinas, D., Munoz-La Rivera, F., e Mora-Serrano, J. (2022). Analisi critica dei metodi di valutazione delle esperienze di realtà estesa (XR) per la sicurezza in ambito edile. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(22), Articolo 15272.
- Santos, IH, Soares, LP, Carvalho, FG e Raposo, AB (2012). Un flusso di lavoro collaborativo di realtà virtuale per il settore petrolifero e del gas. *International Journal of Virtual Reality*, 11(1), 1-13.
- Schober, M. (13 aprile 2017). La realtà virtuale e aumentata ci faranno sentire soli e isolati? Il pericolo nascosto di Tecnologia VREAR. <https://medium.com/@mariussschober/will-vr-and-ar-make-us-feel-lonely-and-isolated-33c4790b5d56> Recuperato 20.5.2024
- Schubert, RS, Hartwig, J., Müller, M., Groh, R. e Pannasch, S. (2016). Le differenze di età sono assenti nella percezione della distanza relativa e assoluta di oggetti virtuali presentati stereoscopicamente? In *Atti della 22a Conferenza ACM su Software e Tecnologia della Realtà Virtuale* (pp. 307-308). Associazione per i macchinari informatici.
- Sharma, RC, e Zamfiroiu, A. (2023). Minacce e vulnerabilità alla sicurezza informatica nel metaverso. *Conferenza internazionale del 2023 sulle tecnologie e le applicazioni del metaverso intelligente (iMETA)* (pp. 1-7). IEEE.
- Shen, R., Weng, D., Guo, J., Fang, H. e Jiang, H. (2019). Effetti della disparità dinamica sull'affaticamento visivo causato dalla visione di video 2D con occhiali VR. In " *Image and Graphics Technologies and Applications: 14a Conferenza su tecnologie e applicazioni di immagini e grafica, articoli selezionati rivisti 14* (pp. 310-321). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-9917-6_30
- Shields, GS, Sazma, MA, e Yonelinas, AP (2016). Gli effetti dello stress acuto sulle funzioni esecutive fondamentali: una meta-analisi e un confronto con il cortisolo. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 68, 651-668.
- Skarbez, R., Smith, M. e Whitton, MC (2021). Rivisitando la realtà-virtualità di Milgram e Kishino continuum. *Frontiere della realtà virtuale*, 2, 647997.
- Smaili, N., e de Rancourt-Raymond, A. (2022). Metaverso: benvenuti nel nuovo mercato delle frodi. *Rivista di criminalità finanziaria*, 31(1), 188-200.
- Souchet, AD, Lourdeaux, D. e Hancock, PA (2023a). Linee guida per la progettazione di una limitazione e l'eliminazione dei sintomi e degli effetti indotti dalla realtà virtuale sul lavoro: una revisione completa e orientata ai fattori. *Frontiere in psicologia*, 14, articolo 1161932.
- Souchet, AD, Lourdeaux, D., Pagani, A., & Rebenitsch, L. (2023b). Una revisione narrativa dell'ergonomia e dei rischi della realtà virtuale immersiva sul posto di lavoro: cybersickness, affaticamento visivo, affaticamento muscolare, stress acuto e sovraccarico mentale. *Realtà Virtuale*, 27(1), 19-50.
- Speicher, M., Feit, AM, Ziegler, P. e Krüger, A. (2018). Inserimento di testo basato sulla selezione nella realtà virtuale. Negli *Atti della conferenza CHI del 2018 sui fattori umani nei sistemi informatici* (pp. 1-13).
- Spiegel, JS (2017). L'etica della tecnologia della realtà virtuale: rischi sociali e raccomandazioni di politica pubblica. *Science and Engineering Ethics*, 24, 1537-1550.
- Stanney, KM, Lawson, BD e Oman, CM (a cura di) (2021). Cybersickness nella realtà virtuale rispetto a Realtà aumentata. *Frontiers Media*. <https://doi.org/10.3389/978-2-88971-812-2>
- Stanney, KM, Lawson, BD, Rokers, B., Dennison, MS, Fidopiastis, CM, Stoffregen, TA, Weech, S. e Fulvio, JM (2020). Identificazione delle cause e delle soluzioni per la cybersickness nella tecnologia immersiva: riformulazione di un programma di ricerca e sviluppo. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 36(19), 1783-1803.
- Stauffert, J., Niebling, F., e Latoschik, ME (2020). Latenza e cybersickness: impatto, cause e misure. Una revisione. *Frontiers in Virtual Reality*, 1, articolo 582204.
- Stephenson, N. (1992). *Incidente sulla neve*. Bantam Books.
- Stoffregen, TA, & Smart, LJ (1998). L'instabilità posturale precede la cinetosi. *Brain Research Bulletin*, 47(5), 437-448.

- Strzażkowski, P., Býý, P., Szóstak, M., & Napiórkowski, M. (2024). Applicazione della tecnologia della realtà virtuale (VR) nel settore minerario e nell'ingegneria civile. *Sostenibilità*, 16(6), articolo 2239.
- Tähkämö, L., Partonen, T. e Pesonen, AK (2019). Revisione sistematica dell'impatto dell'esposizione alla luce sul ritmo circadiano umano. *Chronobiology international*, 36(2), 151-170.
- Takac, M., Collett, J., Blom, KJ, Conduit, R., Rehm, IC, & De Foe, A. (2019). L'ansia da parlare in pubblico diminuisce con ripetute sessioni di formazione in realtà virtuale. *PLoS ONE*, 14(5), Articolo e0216288.
- Tan, DS, Gergle, D., Scupelli, P. e Pausch, R. (2003). Con angoli visivi simili, display più grandi migliorano le prestazioni spaziali. In *Atti della conferenza SIGCHI sui fattori umani nei sistemi informatici* (pp. 217-224). Association for Computing Machinery.
- Tarafdar, M., Cooper, CL e Stich, JF (2019). La triade del tecnostress: tecnostress, tecnostress e design: orientamenti teorici e un programma di ricerca. *Information Systems Journal*, 29(1), 6-42.
- Tatic, D., & Tesic, B. (2015). Miglioramento dei sistemi di sicurezza sul lavoro mediante l'applicazione di tecnologie di realtà aumentata. *23° Forum sulle Telecomunicazioni Telfor (TELFOR) del 2015*. (pp. 962-965). IEEE.
- The Area. (2024a). *Rischi per la sicurezza AR nell'industria*. <https://thearea.org/wp-content/uploads/2018/10/AREA-Safety-Infographic.pdf>
- The Area. (2024b). *Realtà aumentata per l'alleanza aziendale*. <https://thearea.org/>
- Thorp, S., Sæviid Ree, A., & Grassini, S. (2022). Sviluppo temporale del senso di presenza e del cybersickness durante un'esperienza immersiva di realtà virtuale. *Tecnologie multimodali e interazione*, 6(5), Articolo 31.
- Tian, F., Zhang, Y. e Li, Y. (2021). Dal film 2D alla realtà virtuale: una ricerca sul carico di elaborazione basato su diverse velocità di taglio. 12(3), 130. <https://doi.org/10.3390/info12030130> *Informazioni*, Articolo
- Tian, N., Lopes, P. e Boulic, R. (2022). Una revisione della cybersickness nei display montati sulla testa: aumentare l'attenzione sulla suscettibilità individuale. *Realtà virtuale*, 26(4), 1409-1441.
- Truly, A. (12 gennaio 2023). *HTC Vive XR Elite contro Meta Quest Pro: confronto in realtà mista*. Digital Trends. <https://www.digitaltrends.com/computing/htc-vive-xr-elite-vs-meta-quest-pro/>
- Turnbull, PR e Phillips, JR (2017). Effetti oculari dell'uso di visori per realtà virtuale nei giovani adulti. *Rapporti scientifici*, 7(1), articolo 16172.
- Tychsen, L. e Thio, LL (2020). Preoccupazione per le crisi fotosensibili evocate da display video 3D o Visori per realtà virtuale nei bambini: prospettiva attuale. *Occhio e cervello*, 12, 45-48.
- Upadhyay, U., Kumar, A., Sharma, G., Gupta, BB, Alhalabi, W., Arya, V., e Chui, KT (2023). Cyberbullismo nel metaverso: una percezione prescrittiva sui sistemi informativi globali per la protezione degli utenti. *Journal of Global Information Management*, 31(1), 1-25.
- Urey, H., Chellappan, KV, Erden, E. e Surman, P. (2011). Stato dell'arte nei display stereoscopici e autostereoscopici. *Atti dell'IEEE*, 99, 540-555.
- van Acker, BB, Parmentier, DD, Vlerick, P. e Saldien, J. (2018). Comprendere il carico di lavoro mentale: da un'analisi concettuale chiarificatrice verso un quadro implementabile. *Cognition, Technology & Work*, 20, pp. 351-365. <https://doi.org/10.1007/s10111-018-0481-3>
- van Lopik, KV, Sinclair, MA, Sharpe, R., Conway, PP e West, AA (2020). Sviluppare funzionalità di realtà aumentata per le piccole imprese dell'Industria 4.0: lezioni apprese da un caso di studio sulla creazione di contenuti. *Computers in Industry*, 117, articolo 103208.
- van Tulder, M., Malmivaara, A., & Koes, B. (2007). Lesione da sforzo ripetitivo. *The Lancet*, 369(9575), 1815-1822. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(07\)60820-4](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(07)60820-4)
- Vi, S., Silva, TS e Maurer, F. (2019). Linee guida per l'esperienza utente nella progettazione di applicazioni di realtà estesa HMD. In *Human-Computer Interaction-INTERACT 2019: 17th IFIP TC13 International Conference, Atti, Parte IV* (pp. 319-341). Springer International Publishing.

- Vladimir, K., Staša, P., Beneš, F. (2014). Il potenziale dell'identificazione automatica e della realtà aumentata nel settore minerario. In " *Pianificazione mineraria e selezione delle attrezzature: Atti della 22a Conferenza MPES*" (pp. 1205-1213). Springer International Publishing.
- Vovk, A., Wild, F., Guest, W. e Kuula, T. (2018). Malessere da simulatore nell'addestramento in realtà aumentata con Microsoft HoloLens. In *Atti della Conferenza CHI 2018 sui fattori umani nei sistemi informatici* (pp. 1-9). Association for Computing Machinery.
- Wang, Y., Tian, Y., Wang, J., Cao, Y., Li, S., & Tian, B. (2022). Ispezione integrata di QoM, QoP e QoS per le industrie AOI nei metaversi. *IEEE/CAA Journal of Automatic Science*, 9(12), 2071-2071. 2078.
- Wang, Y., Wu, Y., Chen, C., Wu, B., Ma, S., Wang, D., Li, H. e Yang, Z. (2021). Cecità da disattenzione nella guida assistita da display head-up con realtà aumentata. *International Journal of Human-Interaction with the Computer*, 38(9), 837-850.
- Warner, N. e Teo, JT (2021). Lesione neurologica da incidente con realtà virtuale. *BMJ Case Reports CP*, 14, Articolo e243424.
- Whyte, JK, Bouchlaghem, NB, Thorpe, A., & Mccaffer, R. (2000). Dal CAD alla realtà virtuale: approcci di modellazione, scambio dati e strumenti interattivi per la progettazione 3D di edifici. *Automation in Construction*, 10(1), 43-55.
- Widyanti, A., e Hafizhah, HN (2021). L'influenza della personalità, del suono e della difficoltà del contenuto su malattia da realtà virtuale. *Realtà Virtuale*, 26(2), 631-637.
- Wiederhold, BK (2022). Molestie sessuali nel metaverso. *Ciberpsicologia, comportamento e relazioni sociali Rete*, 25(8), 479-480.
- Wismer, A., Reinerman-Jones, L., Teo, G., Willis, S., McCracken, K. e Hackett, M. (2018). Confronto del carico di lavoro durante l'addestramento anatomico con un modello fisico o virtuale. In *Augmented Cognition: Users and Contexts: 12th International Conference, AC 2018, Proceedings, Part II* (pp. 240-252). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-91467-1_20
- Yan, Y., Chen, K., Xie, Y., Yiming, S. e Yonghong, L. (2018). Gli effetti del peso sul comfort dei dispositivi di realtà virtuale. In *Advances in Ergonomics in Design: Atti della conferenza internazionale AHFE 2018 sull'ergonomia nel design* (pp. 239-248). Springer International Publishing.
- Zhang, H. (2017). Sistema di addestramento intuitivo basato sulla realtà virtuale e dotato di display montato sulla testa per l'industria mineraria industria. *Rivista internazionale di scienza e tecnologia mineraria*, 27(4), 717-722.
- Zhang, L., Wade, JW, Bian, D., Fan, J., Swanson, AR, Weitlauf, AS, Warren, Z., & Sarkar, N. (2017). Misurazione del carico cognitivo in un sistema di guida basato sulla realtà virtuale per l'intervento sull'autismo. *IEEE Transactions on Affective Computing*, 8(2), 176-189.
- Zhao, X., Zhang, M., Fan, X., Sun, Z., Li, M., Li, W. e Huang, L. (2023). Realtà estesa per una gestione sicura ed efficace delle costruzioni: stato dell'arte, sfide e direzioni future. *Edifici*, 13(1), Articolo 155.
- Zhu, Y., Wang, X. e Qi, X. (2023). Interazione utente sociale immersiva in realtà virtuale nel metaverso. In *Seconda Conferenza Internazionale su Ingegneria dell'Informazione Elettronica, Big Data e Tecnologia Informatica (EIBDCT 2023)* (Vol. 12642, pp. 770-774). SPIE.
- Zhu, Y., Wang, X. e Qi, X. (2023, maggio). Interazione utente sociale immersiva in realtà virtuale nel metaverso. In *Seconda conferenza internazionale sull'ingegneria informatica elettronica, i big data e la tecnologia informatica (EIBDCT 2023)* (vol. 12642, pp. 770-774). SPIE.
- Zielasko, D., e Riecke, BE (2020). Stare seduti vs. stare in piedi nella realtà virtuale: verso una classificazione sistematica di sfide e (s)vantaggi. *Conferenza IEEE 2020 sulla realtà virtuale e le interfacce utente 3D*. <https://doi.org/10.1109/VRW50115.2020.00067>
Abstract e workshop (VRW) (pp. 297-298).
- Ziker, C., Truman, B., & Dodds, H. (2021). Cross reality (XR): sfide e opportunità in tutto lo spettro. In J. Ryoo, & K. Winkelmann (a cura di), *Ambienti di apprendimento innovativi nell'istruzione superiore STEM. Opportunità, sfide e prospettive future* (pp. 55-77). Springer.

Allegato: Metodologia dello studio

Articolo di letteratura

Criteri di selezione per i documenti

Per studiare gli effetti della realtà virtuale (VR), della realtà aumentata (AR) e del metaverso sulla sicurezza e salute sul lavoro (SSL), sono stati definiti specifici criteri di inclusione ed esclusione prima dell'inizio del processo di selezione della letteratura.

Criteri di inclusione

ÿ **Periodo di tempo.** Pubblicazioni dal 2016 a settembre 2023. Questo periodo è stato selezionato in base agli sviluppi significativi nelle tecnologie VR e AR, in particolare dopo il lancio del primo Oculus nel 2016. Tuttavia, gli articoli pubblicati prima del 2016 sono stati inclusi a partire da ricerche aggiuntive, dalle conoscenze pregresse dell'autore dell'articolo o dal metodo di analisi a valanga applicato dalla ricerca primaria. A causa della rapida evoluzione del settore, sono stati inclusi anche gli articoli pubblicati tra settembre 2023 e febbraio 2024, se pertinenti durante la fase di revisione dell'articolo, se riscontrati dall'autore dell'articolo.

ÿ **Lingua e accessibilità.** Gli articoli devono essere scritti in inglese ed essere accessibili per la revisione.

ÿ **Tipo di pubblicazione.** Articoli sottoposti a revisione paritaria o letteratura grigia.

ÿ **Pertinenza del contenuto.** Gli articoli devono menzionare esplicitamente la realtà virtuale, aumentata (o anche la realtà aumentata e la realtà aumentata, poiché si tratta di terminologie comunemente utilizzate) o le tecnologie del metaverso, concentrandosi sulle loro implicazioni in termini di ergonomia, sicurezza, salute (inclusa la salute mentale) e ambiente di lavoro.

ÿ **Parole chiave.** I documenti devono menzionare parole chiave specifiche (dettagliate di seguito) relative alle preoccupazioni in materia di SSL nel contesto di queste tecnologie.

Criteri di esclusione

ÿ **Limitazioni linguistiche.** Articoli non in inglese o contenenti sezioni in altre lingue.

ÿ **Disponibilità.** Articoli incompleti o inaccessibili.

ÿ **Irrelevanza del contenuto.** Articoli che non affrontano le parole chiave specificate o le problematiche di salute e sicurezza sul lavoro relative a VR, AR, MR, XR e metaverso nei contesti lavorativi.

ÿ **Popolazioni specializzate.** Studi che coinvolgono popolazioni cliniche o utilizzo di tecnologie non correlate al luogo di lavoro. Sono state fatte alcune eccezioni se gli articoli descrivevano rischi e fattori correlati indirettamente alla SSL.

Parole chiave per la selezione iniziale del documento

La ricerca ha incorporato una serie di parole chiave, tra cui i termini: "cybersickness" o "simulator sickness", "nausea", "vertigini", "affaticamento visivo", "affaticamento muscolare", "rischi ergonomici", "disturbi muscoloscheletrici", "stress", "ansia", "intensità del lavoro" o "intensificazione", "carico di lavoro mentale" o "carico cognitivo", "lavoro solitario" o "isolamento", "autonomia" o "controllo del lavoro", "fiducia", "privacy del lavoratore" o "privacy dei dati", "trasparenza", "incidente", "cadute", "inciampi e scivolamenti", "collisione", "salute sul lavoro" o "sicurezza sul posto di lavoro" o "disturbo correlato al lavoro" o "malattia correlata al lavoro" o "infortunio sul lavoro", "rischi professionali" e "rischi professionali", "rischi di SSL" e "rischi di SSL", "rischi sul lavoro" e "pericoli", "salute mentale" e i termini: "lavoro", "realtà virtuale", "realtà aumentata", "realtà mista", "realtà estesa" o "metaverso".

Inoltre, per ciascuno degli usi industriali su cui si è concentrato l'articolo, è stata condotta un'ulteriore ricerca separata utilizzando le parole chiave: ('settore chimico' OPPURE 'edilizia' OPPURE 'assistenza sanitaria' OPPURE 'manifatturiero' O "militare" O "minerario" O "petrolio" O "gas") E "VR" O "AR" O "metaverso".

La ricerca è stata condotta utilizzando Scopus, Web of Science, la biblioteca digitale ACM, IEEE xplora e Google Scholar, concentrandosi sugli articoli che trattano i contesti lavorativi e riportando queste parole chiave nei titoli, negli abstract e nelle parole chiave.

È stato utilizzato un metodo a valanga inversa per identificare ulteriore letteratura rilevante, a partire dalle fonti inizialmente identificate. Ciò si è reso necessario soprattutto per reperire ulteriori studi che approfondissero l'uso e le criticità delle tecnologie XR e del metaverso in settori specifici. Sono stati inoltre aggiunti ulteriori articoli sulla base delle conoscenze pregresse dell'autore dello studio.

L'autore dello studio ha selezionato i lavori ritenuti più pertinenti o rilevanti per l'ambito dell'articolo.

Interviste

Panoramica

Lo studio comprende sei interviste con un totale di sette intervistati (in sei sessioni), che abbracciano una vasta gamma di prospettive relative alla XR in SSL (vedi Tabella 1). In conformità con il quadro di protezione dei dati concordato nello studio, le persone intervistate hanno ricevuto innanzitutto un'Informativa sulla privacy che le informava sul trattamento dei loro dati personali nell'ambito dello studio. Tutte le informazioni relative agli intervistati e le informazioni raccolte durante le interviste sono state mantenute anonime. Ciò è stato fatto rendendo anonimo il copione dell'intervista dopo la registrazione e creando riassunti/note dell'intervista che riportavano le principali informazioni raccolte da ciascuna delle interviste, senza dettagli che potessero rivelare, direttamente o indirettamente, le persone intervistate. Qualsiasi riferimento alle interviste nel testo è fatto in modo completamente anonimo.

Dati demografici dei partecipanti

- **Profili:** specialisti in SSL nel settore XR, operatori e supervisori del settore con esperienza diretta in XR, esperti di sicurezza nazionali e internazionali, rappresentanti di gruppi di interesse della tecnologia XR e stakeholder industriali (vedere Tabella A 1).

Struttura dell'intervista

- **Formato:** interviste semi-strutturate, che incorporano elementi sia qualitativi che quantitativi.
- **Strategia di analisi dei dati. Analisi del contenuto,** in cui le risposte sono state analizzate per estrarre temi e approfondimenti comuni.
- **Adattamento.** Il copione dell'intervista è personalizzato per adattarsi ai diversi contesti e alle competenze degli intervistati. Il copione è stato sviluppato per essere facilmente adattabile a diversi contesti e per essere personalizzato in base alle risposte ricevute dalle persone intervistate. Le persone intervistate hanno spesso preferito parlare liberamente della loro esperienza diretta o delle loro competenze.
- **Reportage narrativo.** I risultati delle interviste vengono riportati in modo narrativo all'interno dell'articolo, includendo riferimenti a fatti specifici narrati dagli intervistati quando si adattano allo scopo dell'articolo o riportati in generale.

Nella tabella A1 sottostante sono riportati il numero delle interviste, come indicato nell'articolo principale, e una breve descrizione del ruolo e delle competenze delle persone intervistate.

Tabella A 1: Numero delle interviste e descrizione degli intervistati

Numero dell'intervista	Ruolo e competenza dell'intervistato
1	Esperto e consulente nel campo delle tecnologie OSH e XR/metaverso.
2	Coordinatore di un'organizzazione dedicata alla promozione dell'integrazione della tecnologia della Realtà Aumentata nel settore aziendale.
3	Consulente senior per aziende e industria, con competenze in materia di sicurezza e inclusività.
4	Responsabile dell'unità salute e sicurezza per un'organizzazione industriale (a livello nazionale). Esperienza diretta con le operazioni di formazione utilizzando la tecnologia XR.
5	Consulente senior presso l'unità nazionale dell'autorità per l'ispezione del lavoro.
6	Esperto tecnico di sicurezza operativa in un'azienda che sviluppa soluzioni XR.
7	Supervisore degli operatori e utilizzatore diretto delle tecnologie XR nel contesto di settori ad alto rischio.

Autore: Simone Grassini, Professore associato, Dipartimento di Scienze psicosociali, Università di Bergen, Laboratorio di neuroscienze cognitive e comportamentali, Università di Stavanger (Norvegia).

Gestione del progetto: Emmanuelle Brun e Maurizio Curtarrelli - Agenzia europea per la sicurezza e la salute sul lavoro (EU-OSHA).

Questa pubblicazione è stata commissionata dall'Agenzia europea per la sicurezza e la salute sul lavoro (EU-OSHA). Il suo contenuto, comprese le opinioni e/o le conclusioni espresse, è esclusivamente di competenza degli autori e non riflette necessariamente il punto di vista dell'EU-OSHA.

Né l'Agenzia europea per la sicurezza e la salute sul lavoro (EU-OSHA) né alcuna persona che agisca per conto dell'agenzia sono responsabili dell'uso che potrebbe essere fatto delle informazioni di cui sopra.

© Agenzia europea per la sicurezza e la salute sul lavoro, 2024

La riproduzione è autorizzata a condizione che venga citata la fonte.

Per qualsiasi utilizzo o riproduzione di foto o altro materiale non protetto da copyright dell'Agenzia europea per la sicurezza e la salute sul lavoro (EU-OSHA), è necessario chiedere l'autorizzazione direttamente ai titolari del copyright.