CAMPI ELETTROMAGNETICI: SFIDE PRESENTI E FUTURE PER LA SALUTE E SICUREZZA SUL LAVORO

Introduzione

Inodore, inudibili e invisibili, i campi elettromagnetici (CEM) – emessi da telefoni cellulari, antenne radio, router Wi-Fi, linee elettriche e così via – sono onnipresenti nella società moderna. Il numero e la varietà delle sorgenti nelle case, nei luoghi pubblici e negli ambienti di lavoro sono in costante aumento. In effetti, negli ultimi anni sono emerse nuove tecnologie pervasive basate sui CEM, come una nuova generazione di tecnologie di telefonia mobile (la quinta, nota anche come 5G), la trasmissione di potenza senza fili e diverse applicazioni mediche. Di fatto, i progressi della tecnologia senza fili sono considerati fattori fondamentali per la digitalizzazione del lavoro ([1]) e per l'Industria 5.0 (Commissione europea, 2022). Questi progressi incidono su molti settori rilevanti per il futuro del lavoro ([2]), quali l'Internet delle cose (IoT), il lavoro ibrido e gli ambienti di lavoro virtuali. Svolgono inoltre un ruolo cruciale nella guida autonoma, negli aeromobili senza equipaggio (UAV), nei sensori e nella robotica avanzata. A causa dell'onnipresenza delle sorgenti di CEM, tuttavia, la discussione in merito a tali campi rappresenta un'area di interesse crescente sia negli ambienti scientifici sia tra la popolazione in generale. Inoltre, data la loro rapida diffusione e il loro maggiore utilizzo in ambito lavorativo, la Commissione europea ha recentemente sottolineato l'importanza di analizzare l'esposizione dei lavoratori ai campi elettromagnetici nonché i possibili effetti avversi per la salute derivanti dall'esposizione a tali campi (Commissione europea, 2021).

Il presente documento mira a individuare gli sviluppi emergenti e futuri delle applicazioni in ambito lavorativo dei CEM e le loro potenziali implicazioni per la salute e sicurezza sul lavoro (SSL). Inoltre, si propone di evidenziare le lacune nelle conoscenze relative ai livelli di esposizione (sicuri). Il documento fornisce altresì raccomandazioni rivolte ai lavoratori e ai datori di lavoro, ai professionisti attivi nei settori della salute e della sicurezza e ai responsabili politici, per ridurre al minimo i rischi associati all'esposizione ai CEM. Per informazioni sui rischi indiretti riguardanti la SSL e sui benefici delle applicazioni pertinenti per il futuro del lavoro rese possibili dai CEM, fare riferimento alle relative pubblicazioni dell'EU-OSHA ([1,2]) riportate nei riferimenti.

Che cosa sono i campi elettromagnetici?

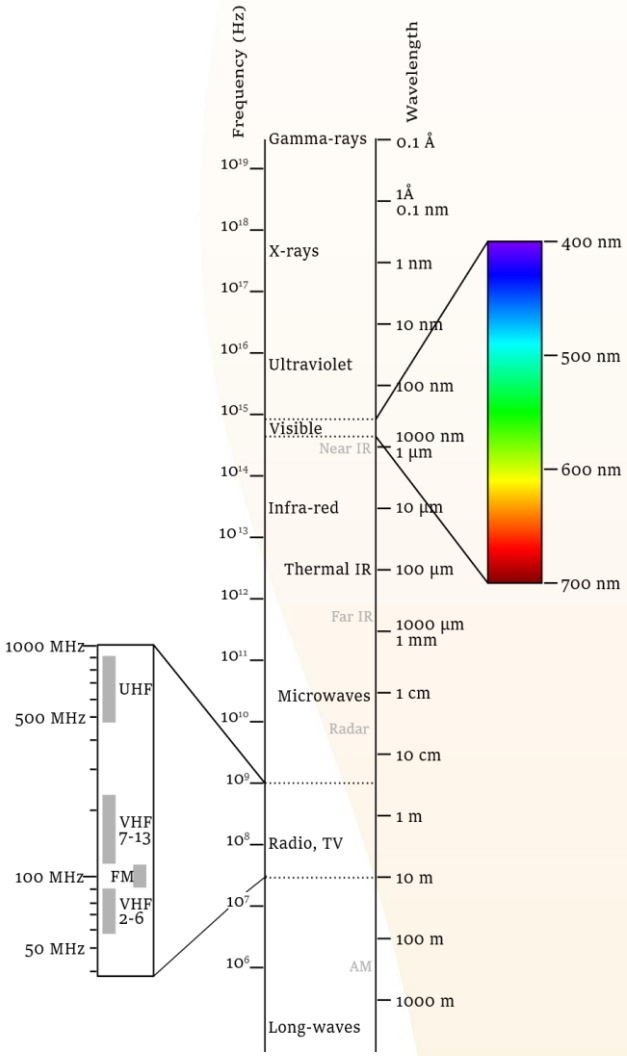
In sostanza, i campi elettromagnetici (CEM) sono generati dallo spostamento delle cariche elettriche e dal movimento sotto forma di combinazione di onde elettriche e magnetiche oscillanti alla velocità della luce. Il campo elettrico deriva dalle forze che le particelle cariche esercitano l'una sull'altra, mentre il campo magnetico è prodotto da cariche mobili (correnti elettriche). I campi elettromagnetici sono caratterizzati dalla loro frequenza o lunghezza d'onda, dalle caratteristiche e dall'intensità del segnale. La frequenza, misurata in hertz (Hz), si riferisce al numero di cicli che l'onda completa al secondo. La lunghezza d'onda, misurata in metri (m), è la distanza tra due picchi dell'onda. Le caratteristiche del segnale si riferiscono, ad esempio, a CEM continui sinusoidali o pulsati. L'intensità è l'energia dell'onda, correlata all'ampiezza (altezza del picco) dell'onda. Il livello di esposizione è l'intensità dell'onda incidente in un punto del corpo, solitamente ponderata (media) in termini di tempo, volume e/o spazio su un periodo, una superficie e/o un volume stabiliti. Tale livello è misurato in termini di densità di potenza (in watt per metro quadrato) o di intensità del campo elettrico (in volt per metro). La frequenza e la lunghezza d'onda sono inversamente proporzionali (figura 1): la lunghezza d'onda (in metri) può essere calcolata dividendo la velocità della luce (30 milioni di metri al secondo, nel vuoto) per la

([1]) Cfr. https://osha.europa.eu/en/themes/digitalisation-work

([2]) Cfr. i documenti di riflessione dell'EU-OSHA riguardanti argomenti pertinenti per il futuro del lavoro all'indirizzo: https://osha.europa.eu/en/publications?f%5B0%5D=facet_tags%3A51&f%5B1%5D=publication_type%3A9&search_api_fulltext=&search_api_language_1%5B0%5D=en&sort_by=field_publication_date

frequenza (in hertz, Hz). Si osservi che, in genere, i campi elettrici e magnetici sono accoppiati a distanze superiori a 10 lunghezze d'onda dalla sorgente; questa regione è chiamata campo lontano.

Figura 1: Lo spettro elettromagnetico



La gamma di frequenza molto bassa e parte della gamma di frequenza intermedia (1 Hz – 100 kHz) non sono incluse in questa figura.

Elenco delle abbreviazioni: MHz = megahertz, dove Hz è l'unità di frequenza e indica il numero di cicli/onde sinusoidali al secondo; UHF = frequenza ultra-alta, VHF = frequenza molto alta; AM = modulazione di ampiezza; FM = modulazione di frequenza; IR = infrarossi; m = metro, cm = centimetro; mm = millimetro; µm = micrometro, nm = nanometro, Å = angstrom = 0,1 nm.

Fonte: Wikimedia Commons [Licenza Creative Commons Attribution-ShareAlike 2.5 Licenza generica]

Esistono sorgenti di campi elettromagnetici sia naturali sia artificiali. In termini generali, le sorgenti artificiali emettono campi elettromagnetici manipolati per trasmettere informazioni o energia. Tuttavia, le applicazioni pratiche variano ampiamente in base alla loro frequenza: da frequenze bassissime (ELF, comprese tra 1 Hz e 300 Hz), osservate nella generazione di energia, a frequenze intermedie (FI, comprese tra 300 Hz e 10 MHz, con 1 MHz = 10^6 Hz; figura 1), alle radiofrequenze (RF, ossia frequenze comprese tra 10 MHz e 300 GHz, con 1 GHz = 10^9 Hz; figura 1), utilizzate nelle applicazioni radar e di comunicazione mobile.

È importante osservare che il presente documento prende in considerazione solo i CEM con frequenze fino ad alcuni terahertz (con 1 Thz = 10^{12} Hz, figura 1), le cosiddette onde radio (ITU, 2020), che si trovano al di sotto della regione a luce visibile e sono ben all'interno della parte dello spettro considerata

non ionizzante, ad esempio quelle prive dell'energia necessaria per rimuovere elettroni strettamente legati da atomi o molecole (rimozione che può portare a danni molecolari ed effetti sulla salute). Ciò significa che, oltre alla luce infrarossa e visibile, altre parti note dello spettro elettromagnetico quali le radiazioni UV, i raggi X e i raggi gamma non vengono prese in considerazione in questa sede.

Ultimi sviluppi relativi ai CEM nel luogo di lavoro

Reti di comunicazione mobile

La **quinta generazione di reti di telecomunicazione (5G)** opera a frequenze mai utilizzate prima, alcune delle quali sono significativamente più elevate di quelle utilizzate nelle generazioni precedenti [fino a 71 GHz (con 1 Ghz = 10^9 Hz), figura 1]. Introduce progressi tecnologici che consentono a un maggior numero di utenti di essere serviti contemporaneamente dalla stessa stazione base. Ciò si ottiene dividendo l'energia trasmessa nello spazio e dirigendola verso gli utenti sotto forma di fascio. Nella maggior parte dei paesi europei, le autorità di regolamentazione hanno ora assegnato e messo all'asta le nuove frequenze.

La diffusione globale delle reti 5G è stata accompagnata da apprensione da parte dell'opinione pubblica per i sospetti rischi per la salute dovuti al presunto aumento dell'esposizione complessiva ai campi elettromagnetici e all'uso di frequenze più elevate (i cui potenziali effetti biologici non sono ancora stati studiati approfonditamente), da disinformazione e persino da atti di vandalismo contro le infrastrutture (ITU, 2021). Sebbene l'aggiunta delle reti 5G possa effettivamente aumentare l'esposizione complessiva ai campi elettromagnetici, questa situazione dovrebbe durare solo fino a quando rimarranno in funzione le reti di generazioni precedenti (CSRSAE, 2023a). Per attenuare le preoccupazioni della popolazione in merito al 5G e monitorare l'impatto effettivo sull'esposizione totale ai campi elettromagnetici e alle radiofrequenze, il programma Orizzonte dell'UE ha finanziato quattro studi internazionali con l'obiettivo di valutare l'impatto sulla salute e sull'ambiente dell'introduzione del 5G anche in ambito lavorativo ([3]). Questi progetti sono iniziati nel 2022 e termineranno tra il 2025 e il 2027.

Alle frequenze più elevate, è necessario un numero crescente di stazioni base per mantenere collegamenti senza fili di alta qualità. Pertanto, sono impiegate stazioni base a piccole celle, collocate su alberi, lampioni e semafori o edifici a poche centinaia di metri di distanza l'una dall'altra (CSRSAE, 2023a). Le piccole celle sono sempre più utilizzate anche nelle reti private/aziendali ([4]) e impiegate in grandi fabbriche, capannoni, porti e aeroporti, campus ecc.

La combinazione di tecniche di trasmissione, frequenze più elevate e densificazione simultanea della rete offerta dal 5G consente comunicazioni senza fili con velocità di trasmissione dei dati (molto) elevate e latenza bassissima, caratteristiche che lo rendono un elemento essenziale per la digitalizzazione del lavoro e per molte applicazioni future in ambito lavorativo. Tuttavia, si prevede che le innovazioni tecnologiche introdotte dal 5G raggiungeranno il loro pieno potenziale solo nella prossima generazione del 6G, il cui avvio è previsto per il 2030. Il progetto faro dell'UE Hexa-X ([5]) prevede persino di far diventare il 6G una tecnologia di uso generale (GPT) anziché una semplice tecnologia abilitante, consentendo di realizzare la telepresenza (completamente immersiva) come il metaverso, il gemellaggio di massa (ossia dashboard in tempo reale e modelli virtuali di dispositivi e impianti (di produzione), la sanità elettronica per tutti, i cobot (robot collaborativi che aiutano gli esseri umani nei loro compiti) e la piena integrazione dell'internet delle cose, con serie di sensori, all'interno e all'esterno dell'organismo. Si prevede pertanto che il 6G avrà un impatto di vasta portata sulle trasformazioni sociali e industriali (Industria 5.0). A tal fine, il 6G utilizzerà parti dello spettro radio di gran lunga al di sopra di ciò che viene già usato o sarà usato in futuro dal 5G (> 100 GHz), il che non solo consentirà velocità di trasmissione molto elevate, ma anche una localizzazione e un rilevamento a livello centimetrico.

Transizione energetica

La transizione energetica in corso verso fonti rinnovabili richiede estensioni e aggiornamenti della rete elettrica (ad es. la diffusione di linee ad alta tensione e di stazioni di conversione) nonché un migliore

([3]) Cfr. https://www.emf-health-cluster.eu/
([4]) Le reti 5G private/aziendali non sono accessibili al pubblico e sono molto protette.
([5]) Cfr. https://hexa-x.eu/. La Commissione europea ha avviato diverse iniziative faro per affrontare le principali sfide in ambito scientifico e tecnologico e promuovere l'innovazione nell'UE: https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/activities/flagships

monitoraggio del consumo energetico istantaneo a livello individuale (ad es. attraverso una rete senza fili di sensori denominati contatori intelligenti). I rischi di esposizione ad esempio per i costruttori, gli elettricisti, gli ingegneri addetti alla manutenzione e per i lavoratori che si occupano dello sviluppo e della manutenzione di nuove infrastrutture (energetiche), la cui esposizione è potenzialmente alta a causa delle correnti elevate, sono ben noti e gli operatori delle centrali elettriche sembrano essere consapevoli dei rischi e di come proteggersi (Stege et al., 2020), anche se i subappaltatori che operano nelle centrali elettriche potrebbero non essere pienamente coscienti del fatto che i funzionari addetti alla salute, alla sicurezza e all'ambiente saranno in grado di istruirli. Inoltre, i contatori intelligenti contribuiscono generalmente in misura ridotta all'esposizione totale alle RF e ai CEM, a causa delle loro trasmissioni sparse e delle loro ubicazioni specifiche (Aerts et al., 2019). Infine, le applicazioni di riscaldamento (industriali) stanno passando sempre più dai combustibili a base di idrocarburi all'induzione elettrica, che comporta un maggior numero di sorgenti di campi magnetici a bassa frequenza, potenzialmente di intensità elevata, che può tuttavia essere mantenuta ampiamente al di sotto dei valori limite di esposizione (Commissione europea, 2015a, b).

Trasferimento di potenza senza fili

Il trasferimento di potenza senza fili (WPT) è emerso come la tecnologia principale per la ricarica dei dispositivi personali (ad es. smartphone e computer portatili, ma anche utensili elettrici) ed è inoltre oggetto di ricerca o già applicato a dispositivi medici (ad es. pacemaker), veicoli elettrici, droni e ad altri robot/veicoli autonomi industriali. Il trasferimento di potenza senza fili applica CEM a radiofrequenza mirati (fasci) oppure utilizza tecnologie induttive o risonanti, che emettono CEM a frequenze comprese tra 10 kHz e 50 MHz (ETSI, 2019). Nel primo caso, l'energia che si propaga nell'aria consente il funzionamento ininterrotto di dispositivi e macchinari, robot e droni. In ambito lavorativo, il WPT riguarda principalmente il settore della manutenzione e della riparazione, l'industria manifatturiera, il settore dei trasporti e della logistica e tutti i settori in cui i lavori vengono svolti utilizzando la robotica (mobile). Anche la ricarica senza fili dei veicoli sarà attuata su più larga scala attraverso l'integrazione nell'infrastruttura (stradale). Ad esempio, diversi veicoli, quali automobili, autobus e camion, vengono già caricati a mezzo di spire a induzione ([6]) nei parcheggi e nelle fermate degli autobus. Inoltre, nel futuro (prossimo), le spire a induzione saranno integrate nelle strade per ricaricare continuamente i veicoli in movimento. Studi recenti, sebbene non condotti in ambito lavorativo, indicano che l'esposizione in prossimità di sistemi WPT è inferiore ai limiti di esposizione (Stam, 2022). Tuttavia, i futuri aumenti di potenza per i sistemi, ad esempio per la ricarica di veicoli elettrici di grandi dimensioni, potrebbero portare a una maggiore esposizione, soprattutto negli ambiti lavorativi.

Assistenza sanitaria

Nel settore sanitario, le applicazioni dei CEM tendono a evolversi verso metodi di maggiore precisione e sempre più potenti, che spesso utilizzano fasci mirati nonché frequenze e potenze più elevate (localizzate). I nuovi sviluppi nell'ambito degli strumenti diagnostici includono l'imaging a particelle magnetiche (5-50 kHz) (Billings et al., 2021) – che potrebbe aumentare in modo significativo l'esposizione degli operatori medici – i radar per l'imaging superficiale (1-60 GHz) (de Waard-Schalkx et al., 2015) e il monitoraggio dei segni vitali (fino a 120 GHz) (Cardillo e Caddemi, 2020), e le frequenze terahertz per l'imaging, la spettroscopia e il trattamento (Amini et al., 2021). Inoltre, anche alcuni nuovi trattamenti cosmetici che utilizzano campi elettromagnetici pulsati a bassa frequenza (15 Hz) o a radiofrequenza (27 Mhz – 5,8 GHz) potrebbero comportare rischi per gli operatori sanitari (Stam, 2022).

Sicurezza

Le frequenze terahertz e delle onde millimetriche sono utilizzate anche per le applicazioni di sicurezza e di scansione, come gli scanner per il controllo dell'intero corpo negli aeroporti, gli scanner postali e quelli per i test non distruttivi. Queste applicazioni possono variare significativamente in termini di intensità: sebbene i livelli di campo negli scanner di sicurezza siano limitati a intensità inferiori ai limiti di esposizione a causa dell'esposizione della popolazione in generale, è possibile che le applicazioni mediche e industriali facciano uso di intensità più elevate, pertanto il loro uso dovrebbe essere riservato a operatori ben addestrati.

([6]) Le spire a induzione per la ricarica trasferiscono energia senza fili attraverso l'induzione elettromagnetica. Questo metodo è ampiamente applicato anche agli elettrodomestici ad esempio gli spazzolini da denti elettrici e i tappetini di ricarica senza fili per gli smartphone.

Implicazioni dei CEM per la salute e sicurezza sul lavoro

Effetti avversi sulla salute, regolamentazione e legislazione in materia di esposizione ai CEM

La ricerca sull'impatto dei campi elettromagnetici sulla salute è stata approfondita, tuttavia le linee guida per la limitazione dell'esposizione si concentrano principalmente sugli effetti acuti e a breve termine. Tali effetti dipendono dalla frequenza dei CEM, dalla loro intensità e dalla durata dell'esposizione. Ad esempio, gli effetti dell'esposizione ai CEM a bassa frequenza oltre i limiti di esposizione previsti dalla SSL comprendono la percezione di cariche elettriche superficiali, la stimolazione diretta del tessuto nervoso e muscolare e l'induzione di fosfeni retinici (ossia falsi lampi di luce). A frequenze più elevate (100 kHz – 300 GHz, figura 1) diminuiscono gli effetti di stimolazione dei nervi e i cambiamenti di permeabilità delle membrane cellulari (a livelli di esposizione molto elevati), con possibili aumenti della temperatura locale e corporea e l'induzione dei cosiddetti effetti termici. Inoltre, è noto che i CEM possono anche produrre effetti indiretti in grado di causare rischi per la sicurezza, quali correnti di contatto, scarichi di scintille ed interferenze elettromagnetiche con i dispositivi medici impiantabili, o il loro riscaldamento.

Tutti questi effetti sono ampiamente compresi e costituiscono la base per le attuali linee guida per la limitazione dell'esposizione stabilite da organismi internazionali quali la Commissione internazionale per la protezione dalle radiazioni non ionizzanti (ICNIRP), che ha elaborato le prove scientifiche sugli effetti avversi per la salute dovuti all'esposizione ai CEM in tre pubblicazioni: una per i campi magnetici statici (ICNIRP, 2009), un'altra per la gamma a bassa frequenza (ossia da 1 Hz a 10 MHz) (ICNIRP, 2010) in cui i campi magnetici ed elettrici dovrebbero essere trattati separatamente in quanto non sono accoppiati in un unico campo magnetico come avviene nel campo lontano, dato che i lavoratori gestiscono sorgenti di CEM non ancora, per lo più, nel campo lontano, e un'ultima pubblicazione per la gamma compresa tra 100 kHz e 300 GHz (ICNIRP, 2020). Sulla base di tali prove scientifiche, l'ICNIRP ha stabilito limiti di esposizione noti come restrizioni di base e livelli di riferimento. I livelli di riferimento derivano dalle restrizioni di base e offrono livelli di protezione equivalenti, ma sono molto più facili da accertare nei luoghi di lavoro. Si osservi che i limiti di esposizione sono definiti per frequenza (banda) e l'ICNIRP definisce un metodo di ponderazione per l'esposizione concomitante di più sorgenti in una determinata posizione nella stessa banda o in altre bande di frequenza. Per tenere conto dell'incertezza scientifica (compresa la variabilità della fisiologia termica tra la popolazione nonché la variabilità dei livelli di attività fisica e delle condizioni ambientali), sono stati applicati, in primo luogo, ulteriori fattori di riduzione alle restrizioni di base, che sono (cinque volte) minori per l'esposizione in ambito lavorativo rispetto a quelle per la popolazione in generale, in quanto quest'ultima è considerata più variabile in termini di età e stato di salute e inconsapevole dei potenziali rischi o incapace di controllarli (ICNIRP, 2020). Il rispetto dei livelli di riferimento e/o delle restrizioni di base dell'ICNIRP è considerato sufficiente a garantire la protezione dagli effetti avversi per la salute accertati.

Inoltre, gli orientamenti e la legislazione dell'UE in materia di esposizione ai campi elettromagnetici si basano sulle linee guida dell'ICNIRP e comprendono la raccomandazione 1999/519/CE del Consiglio europeo relativa alla limitazione dell'esposizione della popolazione ai campi elettromagnetici e la direttiva 2013/35/UE per l'esposizione professionale, che, a partire dal 2017, è stata attuata in tutti gli Stati membri con alcune variazioni nazionali.

Diversi studi (ad es. Rijs e Stam, 2019) hanno esaminato i possibili legami tra l'esposizione a lungo termine ai CEM e vari problemi di salute, tra cui il cancro, problemi riproduttivi, ritardi nello sviluppo e malattie neurodegenerative. Nonostante le ricerche approfondite, tuttavia, le prove scientifiche rimangono inconcludenti; alcuni studi indicano un'associazione ma nessuna relazione causale scientifica, quali, ad esempio, risposte dose-effetto, mentre altri non riscontrano legami significativi (ICNIRP, 2020).

Esposizione ai campi elettromagnetici nel luogo di lavoro

La Commissione europea ha fornito informazioni dettagliate per aiutare i datori di lavoro a comprendere come devono agire per conformarsi alla direttiva 2013/35/UE in tre guide pratiche non vincolanti (Commissione europea, 2015a; 2015b; 2015c), incentrate sugli ambienti di lavoro con presenza di CEM potenzialmente ad alta intensità. Inoltre, esistono varie matrici per valutare il livello di esposizione in base alle diverse sorgenti e occupazioni, da utilizzare come riferimento (Vila et al., 2017; Migault et al.,

2019). Tuttavia, i nuovi sviluppi nelle applicazioni dei CEM sopra descritte potrebbero comportare un'ulteriore esposizione, maggiore o alterata a tali campi in ambito lavorativo, come indicato di seguito.

- La densificazione della rete di telefonia mobile (ossia un numero maggiore di antenne di stazioni base per superficie) si traduce in un aumento del numero di persone che lavorano più vicino alle antenne di telecomunicazione rispetto al passato, in particolare quando sono utilizzate stazioni base a piccole celle. Ciò è valido in generale (ad es. per conciatetti ed elettricisti), ma, in particolare, per i luoghi di lavoro con reti senza fili proprie (ad es. telefono cellulare privato/aziendale, Wi-Fi e/o reti di sensori), soprattutto quando la quantità di dispositivi e sensori senza fili (personali) è in aumento in tali ambienti di lavoro. I sensori indossabili (ad es. per il monitoraggio dell'esposizione sulla salute personale), in particolare, potrebbero aumentare l'esposizione dei lavoratori ai CEM in modo localizzato (ad es. limitatamente alla zona del corpo in cui viene applicato il sensore). Si prevede che queste innovazioni tecnologiche siano pervasive e non legate a un settore specifico.
- La crescente presenza di sistemi WPT (su larga scala) potrebbe aumentare l'esposizione ai campi elettromagnetici a frequenze diverse in base alla tecnologia utilizzata (cfr. la sezione 3) nei settori dei trasporti e della logistica (ad es. conducenti di autobus e camion). Ciò vale anche per i luoghi di lavoro in cui gli strumenti personali e i robot/UAV vengono caricati senza fili su piattaforme simili a quelle utilizzate per i telefoni cellulari, ma più grandi, anziché utilizzare la carica a contatto tramite pin.
- L'elettrificazione potrebbe aumentare l'esposizione ai campi magnetici a bassa frequenza (provenienti da linee elettriche ad alta tensione, invertitori e processi di riscaldamento industriale, come il riscaldamento a induzione) (CSRSAE, 2023b).
- Poiché la quantità di applicazioni dei campi elettromagnetici nel settore medico è in aumento, un numero maggiore di operatori sanitari (compreso il personale non tecnico) potrebbe essere esposto a campi elettromagnetici in un'ampia gamma di frequenze (Stam e Yamaguchi-Sekino, 2017; Turuban, 2023).
- L'uso di frequenze sempre più elevate (non solo nelle reti di telefonia mobile, ma anche nelle applicazioni di scansione in ambito medico e di sicurezza) potrebbe comportare un aumento delle esposizioni localizzate, tuttavia superficiali, i cui rischi non sono ancora chiari.

Prevenzione dei rischi per la SSL connessi ai campi elettromagnetici

Ai sensi della direttiva 2013/35/UE, i datori di lavoro sono tenuti a valutare tutti i rischi derivanti dalle esposizioni ai campi elettromagnetici sul luogo di lavoro e a mettere in atto misure di prevenzione adeguate. In particolare, devono garantire il rispetto dei livelli limite previsti dalla direttiva. In primo luogo, ciò avviene sulla base di informazioni facilmente accessibili: specifiche condivise dal fabbricante (ad es. se l'applicazione in questione soddisfa i requisiti della normativa dell'UE pertinente sui prodotti che possono stabilire livelli di sicurezza più rigorosi di quelli previsti dalla direttiva 2013/35/UE), matrici di esposizione per sorgente e/o occupazione (Vila et al., 2017; Migault et al., 2019), studi di revisione e/o guide pratiche pubblicate dall'UE, dalle istituzioni nazionali e dagli organismi di normazione. Ad esempio, i documenti (Commissione europea, 2015a; 2015b) contengono elenchi di attrezzature e luoghi di lavoro che richiedono potenzialmente **valutazioni specifiche dei rischi**. Inoltre, forniscono orientamenti sulla necessità di una valutazione dei rischi dei campi elettromagnetici per i lavoratori a rischio specifico, come quelli che utilizzano dispositivi medici attivi, compresi i pacemaker (Modenese e Goba, 2021). Tuttavia, queste informazioni potrebbero non essere ancora sufficienti per valutare se sarà soddisfatto il rispetto dei valori limite di esposizione per le nuove applicazioni emergenti di campi elettromagnetici e i rischi per la salute e la sicurezza sul lavoro associati. In tal caso, dovrebbero essere effettuate misurazioni *in situ* o calcoli dosimetrici e confrontate con i limiti di legge, tenendo conto di tutte le incertezze correlate.

In caso di superamento dei livelli limite, devono essere adottate misure di protezione e di prevenzione [cfr. gli esempi riportati in (Commissione europea, 2015a; 2015b)]. Poiché l'intensità dei campi elettromagnetici diminuisce rapidamente con l'aumento della distanza dalla sorgente, la misura di riduzione dell'esposizione più efficace è l'aumento della distanza tra la sorgente e il lavoratore. Tale obiettivo può essere raggiunto mediante misure tecniche e organizzative quali barriere, segnali e istruzioni di lavoro. Inoltre, la schermatura è efficace per tutti i tipi di campi elettromagnetici, ad eccezione dei CEM a bassa frequenza. Le informazioni sulla riduzione dell'esposizione ai campi elettromagnetici sono fornite anche negli orientamenti della Commissione europea (Commissione

europea, 2015a), comprese le misure per la progettazione delle postazioni di lavoro e le disposizioni relative alle attrezzature e ai metodi di lavoro. Ad esempio, le bobine, i trasformatori e le piattaforme di ricarica senza fili devono essere sicuri per progettazione se tenuti a distanza dalle stazioni di lavoro. Non dovrebbe essere possibile sostare esattamente davanti alle antenne trasmittenti.

Lacune, esigenze, priorità e raccomandazioni riguardanti campi elettromagnetici e SSL

Ricerca scientifica

Esiste una generale carenza di studi sugli effetti sulla salute e sull'intensità dell'esposizione ai campi elettromagnetici per quanto riguarda:

1. le frequenze utilizzate nelle tecnologie emergenti per le comunicazioni mobili (ossia tra 6 e 300 GHz);
2. le frequenze intermedie impiegate per il trasferimento di elettricità senza fili;
3. le frequenze (sub-)THz utilizzate nelle nuove tecnologie di imaging e di scansione (e l'uso previsto con il 6G). Le maggiori lacune nella ricerca riguardano:
    a. i livelli di esposizione, in particolare nelle professioni che fanno uso di apparecchiature in grado di generare campi magnetici, elettrici o elettromagnetici potenzialmente forti (Turuban, 2023);
    b. i possibili effetti sulla salute (a causa dei quali si verificano potenziali meccanismi di interazione biologica) (Jeschke, 2022);
    c. l'esposizione cumulativa a lungo termine ai campi elettromagnetici in ambito lavorativo (Hansson Mild, 2023); e
    d. il criterio di esposizione più pertinente (Turuban, 2023).

Inoltre, gli effetti sanitari e sensoriali dovuti all'esposizione ai campi elettromagnetici possono variare notevolmente da un lavoratore all'altro. L'esposizione ai CEM è influenzata da diversi fattori personali e ambientali, tra cui:

- caratteristiche personali: anatomia, caratteristiche corporee, compresi impianti o piercing e uso di medicinali;
- postura di lavoro: la posizione e il movimento del corpo durante l'attività lavorativa;
- ambiente di lavoro:
    - materiali da costruzione: il calcestruzzo può attenuare e schermare parzialmente le radiofrequenze e i campi elettromagnetici attraverso le maglie di ferro, mentre il legno può essere usato come schermatura;
    - uso degli strumenti: la manipolazione o l'utilizzo degli strumenti (Jeschke, 2023) può incidere sui livelli di esposizione.

Questa variabilità tra diverse categorie di lavoratori e tra un lavoratore e l'altro induce una notevole incertezza negli attuali studi di valutazione dell'esposizione e nelle matrici di esposizione che utilizzano tali dati (Turuban, 2023).

Pertanto, sono richiesti progetti di studio che utilizzino scenari di esposizione realistici sul luogo di lavoro [ad es. picchi di esposizione elevati seguiti da periodi di assenza di esposizione (Hansson Mild, 2023) o esposizioni prossime ai livelli limite per la durata di otto ore o più (Jeschke, 2022)] e/o che raccolgano dati dettagliati e descrittivi su:

(a) i criteri occupazionali tipici quali l'anatomia del lavoratore, le posizioni e le posture di lavoro, l'attività fisica, gli ambienti gravosi e la gestione degli strumenti, in particolare quelli che emettono campi elettromagnetici (Jeschke, 2022);

(b) le caratteristiche di emissione dei CEM, ad es. frequenza e modulazione delle sorgenti in ambito professionale (Jeschke, 2022);

(c) le potenziali esposizioni nell'arco della vita lavorativa (Hansson Mild, 2023); e

(d) gli effetti sulla salute diversi da quelli già noti (ad es. dovuti agli effetti termici di RF-CEM) (Jeschke, 2022).

Questi tipi di studi migliorerebbero significativamente la comprensione scientifica dei livelli e della durata dell'esposizione ai campi elettromagnetici nei diversi contesti professionali e potrebbero essere utilizzati come punto di partenza più preciso per gli studi epidemiologici sugli effetti sulla salute dovuti all'esposizione ai CEM, che attualmente non prendono quasi in considerazione l'esposizione professionale. Ciò che è necessario, tuttavia, sono dati individuali a lungo termine sui livelli di esposizione professionale in combinazione con altre esposizioni ambientali/professionali (pertinenti) (ad es. attraverso reti di sensori per l'internet delle cose), per cercare cofattori o determinanti (Stam e Rijs, 2019; Hansson Mild et al., 2023). Purtroppo, non sono (spesso) ancora disponibili dispositivi di misurazione a basso costo adeguati per l'acquisizione di tali dati e sarà necessario svilupparli e diffonderne l'uso in particolare tra le persone (altamente) esposte.

Politica dell'UE

Poiché nel 2020 la Commissione internazionale per la protezione dalle radiazioni non ionizzanti (ICNIRP) ha pubblicato nuove linee guida alle quali fanno già riferimento diverse norme tecniche (ad es. IEC 62232:2023 e IEC TR 63377:2022) e la direttiva 2013/35/UE si basa ancora sulle linee guida del 1998, 2009 e 2010, la situazione giuridica è diventata complessa. Nella sua recente consulenza, il comitato scientifico dei rischi sanitari, ambientali ed emergenti (CSRSAE) si è espresso pertanto positivamente sulla necessità di una revisione tecnica degli allegati della raccomandazione 1999/519/CE del Consiglio e della direttiva 2013/35/UE per quanto riguarda i campi elettromagnetici a radiofrequenza (da 100 kHz a 300 GHz) (CSRSAE, 2023a). Infatti, rispetto a quelle del 1998, le linee guida del 2020 contengono anche adattamenti relativi all'esposizione alle sorgenti emergenti di CEM, quali le telecomunicazioni 5G, basate su esposizioni brevi e localizzate a frequenze più elevate (fino a 300 GHz). È chiaro che l'introduzione di nuove tecnologie dei campi elettromagnetici sta aumentando la complessità della valutazione dell'esposizione ai CEM sul luogo di lavoro, di conseguenza è necessaria una maggiore e più dettagliata conoscenza dei metodi di misurazione e modellizzazione da parte dei funzionari del comitato esecutivo per la salute e la sicurezza (Jeschke, 2022; Stam, 2022).

Pertanto, le considerazioni pratiche relative alla valutazione dell'esposizione ai campi elettromagnetici sul luogo di lavoro e alla durata dell'esposizione durante le ore di lavoro nell'arco di decenni, sono essenziali per una prassi affidabile di valutazione dei rischi per la SSL (Jeschke et al., 2022). Tali considerazioni devono ancora essere sviluppate, insieme a dispositivi di misurazione appropriati, e potrebbero essere trattate in versioni aggiornate della letteratura della Commissione europea (Commissione europea, 2015a; 2015b; 2015c) o fornite nelle norme tecniche pertinenti.

Infine, è importante osservare che, sebbene l'ICNIRP (2020) dichiari l'importanza della «capacità sensoriale e comportamentale» dei lavoratori di «essere consapevoli dei potenziali rischi legati a RF-CEM e di adottare adeguate misure di mitigazione del danno», in Jeschke et al. (2022) si osserva giustamente che la direttiva quadro dell'UE del 1989 (89/391/CEE) «dà la priorità alle misure di protezione collettiva rispetto alle misure di protezione individuale». Tuttavia, per la SSL è obbligatorio effettuare valutazioni (individuali) dei rischi per i lavoratori particolarmente a rischio. Pertanto, sono necessarie linee guida adeguate che potrebbero essere facilmente estese a tutti i lavoratori.

Datori di lavoro, lavoratori ed esperti di SSL

Nonostante la disponibilità di matrici di esposizione e guide pratiche sull'esposizione ai CEM in contesti professionali (comprese le misure di riduzione dell'esposizione), la conoscenza da parte dei lavoratori delle sorgenti e delle esposizioni ai campi elettromagnetici in ambito professionale è «generalmente bassa» (Turuban, 2023). Inoltre, i lavoratori potrebbero non considerare pericolosi tali campi e potrebbero quindi non prestare la necessaria attenzione alla prevenzione, magari anche ritenendo fastidiose le misure di prevenzione (Stege, 2022). Al fine di informare più efficacemente i datori di lavoro, i lavoratori e gli esperti di SSL, i sensori che misurano l'esposizione ai campi elettromagnetici (Bhatt et al., 2022) potrebbero essere forniti dal datore di lavoro per essere indossati dai lavoratori o installati in ambienti ad alta intensità di CEM. Tali dispositivi indossabili forniranno un allarme rapido, nonché i dati necessari per gli studi scientifici sulle esposizioni professionali ai CEM e sui potenziali effetti sulla salute (cfr. 5.1). I gruppi destinatari specifici per il monitoraggio con sensori indossabili comprendono i lavoratori che utilizzano attivamente sorgenti di campi elettromagnetici (ad es. fisioterapisti e personale addetto alla sicurezza) o coloro che lavorano in prossimità di tali sorgenti,

come gli elettricisti. Tra questi sono inclusi soprattutto i lavoratori che potrebbero inconsapevolmente avvicinarsi a sorgenti attive di CEM, ignari dei potenziali rischi, come il personale infermieristico o quello addetto alla manutenzione e alle pulizie. Quest'ultimo gruppo sta acquisendo sempre maggiore rilevanza, considerata l'introduzione delle reti 5G private e dei sistemi WPT.

Sebbene le misurazioni *in situ* siano ampiamente utilizzate nella valutazione dei CEM per quanto riguarda la salute e sicurezza sul lavoro, se vi è motivo di presumere che siano stati superati i livelli limite, sono necessarie una simulazione e una determinazione numerica per stabilire la conformità ai limiti di esposizione e queste si sono dimostrate molto impegnative per i professionisti della SSL a causa dei costi connessi e delle competenze richieste (Jeschke, 2022). Emerge, pertanto, una richiesta di regole empiriche che consentano un calcolo rapido per garantire il rispetto dei limiti. Vari paesi hanno già elaborato tali linee guida, cfr. ad esempio Bolte e Pruppers (2006).

Osservazioni conclusive

Il presente documento fornisce una panoramica completa delle implicazioni delle applicazioni emergenti dei campi elettromagnetici per la SSL, evidenziando l'onnipresenza di tali campi nei moderni ambienti di lavoro a causa dei progressi tecnologici che li rendono fattori essenziali della digitalizzazione del lavoro e dell'Industria 5.0 (tra cui l'automazione avanzata, la robotica, la virtualizzazione, il lavoro a distanza, le sale di controllo e così via).

La valutazione dei rischi di esposizione ai CEM è molto complessa a causa della diversità delle sorgenti in termini di frequenza, intensità e utilizzo, in particolare nei contesti professionali, nonché della varietà dei relativi effetti avversi sulla salute. Inoltre, sebbene gli effetti gravi dell'esposizione a livelli elevati di campi elettromagnetici alle frequenze attualmente utilizzate siano ben compresi, permangono controversie e lacune riguardo agli effetti a lungo termine delle esposizioni a bassi livelli e all'uso futuro di frequenze sempre più elevate. Pertanto, le norme di regolamentazione e le linee guida (pratiche) volte a tutelare i lavoratori devono essere costantemente aggiornate, sulla base delle più recenti ricerche. A tal fine, si raccomanda vivamente il monitoraggio a lungo termine dei livelli di esposizione ai campi elettromagnetici sul luogo di lavoro, nelle bande di frequenza pertinenti, utilizzando sensori fissi e indossabili e in combinazione con i parametri di salute dei lavoratori.

In sintesi, è necessario un approccio multidisciplinare alla valutazione dell'esposizione ai CEM e alla prevenzione dei rischi, che comprenda ricerche specifiche per ogni professione, un adeguamento costante delle politiche e una comunicazione efficace tra le parti interessate in materia di SSL, al fine di garantire la salute e la sicurezza dei lavoratori in un ambiente sempre più connesso e alimentato senza fili.

Ringraziamenti

Si ringraziano Rianne Stam (Istituto nazionale neerlandese per la salute pubblica e l'ambiente – RIVM), Stefania Marassi (Law, THUAS) ed Emanuelle Brun e Annick Starren (EU-OSHA) per la revisione critica e i proficui dibattiti.

Riferimenti

Amini, T., Jahangiri, F., Ameri, Z., e Hemmatian, M. A. (2021). A review of feasible applications of THz waves in medical diagnostics and treatments. *Journal of Lasers in Medical Sciences*, *12*, e92.

Bhatt CR, Henderson S, Brzozek C, Benke G. (2022) Instruments to measure environmental and personal radiofrequency-electromagnetic field exposures: An update. *Physical and Engineering Sciences in Medicine*, 45(3), 687-704. https://link.springer.com/article/10.1007/s13246-022-01146-y

Bolte, J.F.B. e Pruppers, M.J.M., 2006. Electromagnetic fields in the working environment (June 2006). *SZW-report RIVM-nr 610015001*, ministero degli Affari sociali e dell'occupazione (SZW) / Istituto nazionale per la salute Pubblica e l'ambiente (RIVM) https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/610015001.pdf

Billings, C., Langley, M., Warrington, G., Mashali, F. e Johnson, J. A. (2021). Magnetic particle imaging: Current and future applications, magnetic nanoparticle synthesis methods and safety measures. *International Journal of Molecular Sciences, 22*.

Cardillo, E. e Caddemi, A. (2020). A review on biomedical MIMO radars for vital sign detection and human localization. *Electronics, 9(9)*, articolo 9.

De Waard-Schalkx, I., Stam, R., van der Schaaf, M. e Bijwaard, H. (2015). Recent developments in medical techniques involving ionising or non-ionising radiation: Update 2014. *RIVM Report 2014-0070*, Bilthoven, Istituto nazionale per la salute pubblica e l'ambiente.

EU-OSHA – Agenzia europea per la sicurezza e la salute sul lavoro (2023). *Documento di sintesi: Sistemi intelligenti di monitoraggio digitale per la salute e la sicurezza sul lavoro: opportunità e sfide* https://osha.europa.eu/en/publications/smart-digital-monitoring-systems-occupational-safety-and-health-opportunities-and-challenges.

Commissione europea (2021). *Comunicazione della Commissione al Parlamento europeo, al Consiglio, al Comitato economico e sociale europeo e al Comitato delle regioni – Quadro strategico dell'UE in materia di salute e sicurezza sul lavoro 2021-2027. Sicurezza e salute sul lavoro in un mondo del lavoro in evoluzione,* COM(2021) 323 final. Tratto da https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX%3A52021DC0323

Direzione generale per l'Occupazione, gli affari sociali e l'inclusione della Commissione europea (2015a). *Guida non vincolante di buone prassi per l'attuazione della direttiva 2013/35/UE relativa ai campi elettromagnetici. Volume 1, Guida pratica.* Bruxelles, Belgio.

Direzione generale per l'Occupazione, gli affari sociali e l'inclusione della Commissione europea (2015b). *Guida non vincolante di buone prassi per l'attuazione della direttiva 2013/35/UE relativa ai campi elettromagnetici. Volume 2, Studi di casi.* Bruxelles, Belgio.

Direzione generale per l'Occupazione, gli affari sociali e l'inclusione della Commissione europea (2015c). *Guida non vincolante di buone prassi per l'attuazione della direttiva 2013/35/UE relativa ai campi elettromagnetici. Volume 3, Guida per le PMI.* Bruxelles, Belgio.

Commissione europea (2022). Industry 5.0: A Transformative Vision for Europe - ESIR Policy Brief No. 3. Ufficio delle pubblicazioni dell'Unione europea, ISBN 978-92-76-43352-1.

European Telecommunications Standards Institute (ETSI) (2019). *ETSI TR 103 493 V1.1.1.: System Reference document (SRdoc); Wireless Power Transmission (WPT) systems operating below 30 MHz.* Sophia Antipolis Cedex, Francia.

Hansson Mild K, Mattsson MO, Jeschke P, Israel M, Ivanova M e Shalamanova T. (2023). *Occupational exposure to electromagnetic fields–Different from general public exposure and laboratory studies. International Journal of Environmental Research and Public Health*. 20(16), 6552.

Unione internazionale delle telecomunicazioni (UIT) (2020). *Radio Regulations Articles: Edition of 2020.*

Unione internazionale delle telecomunicazioni (UIT) (2021). *Executive report ITU regional assessment for Europe on EMF exposure limits and risk communication challenges.*

Jeschke, P., Alteköster, C., Hansson Mild, K., Israel, M., Ivanova, M., Schiessl, K., Shalamanova, T., Soyka, F., Stam, R. e Wilén, J. (2022). Protection of workers exposed to radiofrequency electromagnetic fields: A perspective on open questions in the context of the new ICNIRP 2020 guidelines. *Frontiers in Public Health*, 10.

Migault, L., Bowman, J. D., Kromhout, H., Figuerola, J., Baldi, I., Bouvier, G., Turner, M. C., Cardis, E. e Vila, J. (2019). Development of a job-exposure matrix for assessment of occupational exposure to high-frequency electromagnetic fields (3 kHz–300 GHz). *Annals of Work Exposures and Health*, 63(9), 1013–1028.

Modenese, A. e Gobba, F. (2021). Occupational exposure to electromagnetic fields and health surveillance according to the European Directive 2013/35/EU. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(4), 1730.

Rijs KJ e Stam R. (2019). Onderzoek naar mogelijke langetermijneffecten van elektromagnetische velden op de gezondheid van werknemers – update 2019 [Ricerca sui possibili effetti a lungo termine dei campi elettromagnetici sulla salute dei lavoratori – aggiornamento 2019]. *RIVM Report* 2019-0010. Bilthoven: RIVM.

Comitato scientifico dei rischi sanitari, ambientali ed emergenti (CSRSAE) (2023a). *Opinion on the need of a revision of the annexes in the Council Recommendation 1999/519/EC and Directive 2013/35/EU, in view of the latest scientific evidence available with regard to radiofrequency (100kHz - 300GHz)*.

Comitato scientifico dei rischi sanitari, ambientali ed emergenti (CSRSAE) (2023b). *Potential health effects of exposure to electromagnetic fields (EMF): 14 Update with regard to frequencies between 1Hz and 100 kHz.*

Stam, R., e Yamaguchi-Sekino, S. (2018). Occupational exposure to electromagnetic fields from medical sources. *Industrial Health*, *56*(2), 96–105. https://doi.org/10/g8hwgs

Stam, R. (2021). Occupational exposure to radiofrequency electromagnetic fields. *Industrial Health*, *60*(3), 201–215.

Stam, R. (2022) Bronnen van blootstelling van werknemers aan elektromagnetische velden: Nieuwe ontwikkelingen [Sorgenti di esposizione dei lavoratori ai campi elettromagnetici: nuovi sviluppi]. *RIVM-briefrapport 2022-0109*. Bilthoven: RIVM.

Stege, T. A. M., Bolte, J. F. B., Claassen, L. e Timmermans, D. R. M. (2020). Electromagnetic field exposure in power plants: A qualitative assessment of work safety perceptions among employees. *Journal of Risk Research, 23*(12), 1650–1660.

Stege, T. A. M. (2022). *Development of risk communication tools for occupational exposures.* (tesi di dottorato), Università libera di Amsterdam (VU) e Istituto nazionale neerlandese per la salute pubblica e l'ambiente (RIVM), Paesi Bassi, consulenti D.R.M. Timmermans, L. Claassen, J.F.B. Bolte, ISBN 978-94-6421-796-4. Tratto da: https://research.vu.nl/en/publications/development-of-risk-communication-tools-for-occupational-exposure

Turuban, M., Kromhout, H., Vila, J., Vallbona-Vistós, M., Baldi, I. e Turner, M. C. (2023). Personal exposure to radiofrequency electromagnetic fields in various occupations in Spain and France. *Environment International, 180*, 108156.

Vila, J., Bowman, J. D., Figuerola, J., Moriña, D., Kincl, L., Richardson, L. e Cardis, E. (2017). Development of a source-exposure matrix for occupational exposure assessment of electromagnetic fields in the INTEROCC study. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology, 27*(4), 398–408.

Autori: Sam Aerts, John Bolte.

Smart Sensor Systems research group, Faculty Technology, Innovation & Society, The Hague University of Applied Sciences (THUAS), Paesi Bassi.

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

Il presente documento di riflessione è stato commissionato dall'EU-OSHA. I suoi contenuti, incluse le opinioni e/o conclusioni formulate, sono attribuibili esclusivamente agli autori e non riflettono necessariamente la posizione dell'EU-OSHA.

L'EU-OSHA, o chiunque agisca in suo nome, declina ogni responsabilità per l'uso dei contenuti che seguono.

© Agenzia europea per la sicurezza e la salute sul lavoro, 2026

La riproduzione è autorizzata con citazione della fonte.

L'uso o la riproduzione di fotografie o di altro materiale non protetto dal diritto d'autore dell'Agenzia europea per la sicurezza e la salute sul lavoro devono essere autorizzati direttamente dal titolare del diritto d'autore in questione.