

INTRODUZIONE

I disturbi muscoloscheletrici lavoro correlati colpiscono la schiena, il collo, le spalle e gli arti superiori e inferiori e possono far insorgere patologie da sovraccarico biomeccanico, quali le patologie delle strutture osteoarticolari, muscolotendinee e nervovascolari. I problemi di salute possono essere malesseri e dolori di lieve entità, ma anche affezioni mediche più gravi che costringono ad assentarsi dal lavoro o per le quali sono necessarie cure mediche. Nei casi più gravi, possono persino portare a disabilità e alla necessità di abbandonare il lavoro.

Per la valutazione del rischio non esiste un unico metodo, tuttavia, a prescindere dal metodo di valutazione, è necessario identificare i rischi da sovraccarico biomeccanico (responsabili dell'insorgenza dei suddetti disturbi muscoloscheletrici lavoro correlati) e adottare misure di prevenzione idonee a eliminare o quantomeno ridurre il potenziale danno. Le misure possono riguardare i seguenti ambiti:

- configurazione del luogo di lavoro, che dovrebbe tendere a migliorare le posture lavorative;
- attrezzatura di lavoro utilizzata, che dovrebbe essere concepita in modo ergonomico e adatta alle mansioni da svolgere;
- mansioni da svolgere, che dovrebbero tenere in considerazione la selezione di metodi o strumenti di lavoro, che riducano il rischio di sovraccarico biomeccanico;
- gestione dell'attività lavorativa, pianificando il lavoro onde evitare attività ripetitive o prolungate con posture scorrette e pianificare pause, avvicinarsi nello svolgimento delle mansioni o riassegnare il lavoro;
- fattori organizzativi, definendo una politica sui disturbi muscoloscheletrici per migliorare l'organizzazione del lavoro e l'ambiente psicosociale sul luogo di lavoro, nonché promuovere la salute muscoloscheletrica.

Nella configurazione dei luoghi di lavoro, per esempio, è necessario progettare le postazioni di lavoro con caratteristiche posturali ergonomiche, come:

- nessuna postura condizionata (inginocchiarsi, piegarsi, accovacciarsi, etc.)
- regolare alternanza tra sollecitazione (trazione, spinta, carico, ecc.) e sollievo (posizione di riposo);
- regolare alternanza tra modelli posturali (seduto, in piedi, in movimento, ecc.).

Nell'acquisto delle attrezzature di lavoro è necessario progettare l'uso, affinché il lavoratore non sia poi costretto ad assumere posizioni incongrue per utilizzarle nell'esecuzione del compito/lavoro assegnatogli.

L'attività del lavoratore, intesa come mansione, dovrebbe essere organizzata affinché lo stesso possa effettuare movimenti che non portino ad un affaticamento prolungato dell'apparato musco-scheletrico: cambiare utensili e/o posizione di lavoro durante l'attività, non rimanere costantemente nella stessa posizione, effettuare movimenti differenti, sono tra le soluzioni adottabili per ridurre il rischio.

Variare l'attività durante l'orario lavorativo è un efficace metodo per evitare la ripetitività, all'interno della stessa mansione, organizzare i lavoratori nello svolgimento degli incarichi predisponendo scambi nelle singole operazioni.

Nei casi in cui le misure di prevenzione sopra riportate non potessero risultare efficaci per la mitigazione del rischio di sovraccarico biomeccanico, si sta ricorrendo in ambito lavorativo all'utilizzo di specifici esoscheletri occupazionali.

1 SCOPO E CAMPO DI APPLICAZIONE

Gli esoscheletri occupazionali sono dispositivi indossabili portatili di servizio, che agiscono sul corpo in modo meccanico, assistendo l'operatore durante un'attività lavorativa. Questi dispositivi si propongono come soluzioni tecnologiche volte a ridurre il carico fisico o limitare l'adozione di posture incongrue di un lavoratore, al fine di prevenire possibili disturbi muscoloscheletrici negli ambienti di lavoro.

Potenzialmente gli esoscheletri occupazionali sono in grado di offrire una soluzione laddove altre misure tecniche, organizzative o di progettazione ergonomica non siano realizzabili o efficaci a mitigare i fattori di rischio da sovraccarico biomeccanico.

In quest'ottica il presente rapporto tecnico si propone di:

- indicare la terminologia e definizioni abitualmente adottate nel settore degli esoscheletri occupazionali
- individuare e descrivere le caratteristiche degli esoscheletri ad oggi sviluppati ed in uso negli ambienti di lavoro;
- illustrare i principi generali di progettazione e costruzione degli esoscheletri;
- rappresentare i settori lavorativi dove gli esoscheletri hanno trovato applicazione;
- inquadrare le potenziali opportunità e problematiche correlate all'uso degli esoscheletri.

2 RIFERIMENTI NORMATIVI

Il presente rapporto tecnico rimanda, mediante riferimenti datati e non, a disposizioni contenute in altre pubblicazioni. Tali riferimenti normativi sono citati nei punti appropriati del testo e sono di seguito elencati. Per quanto riguarda i riferimenti datati, successive modifiche o revisioni apportate a dette pubblicazioni valgono unicamente se introdotte nel presente rapporto tecnico come aggiornamento o revisione. Per i riferimenti non datati vale l'ultima edizione della pubblicazione alla quale si fa riferimento (compresi gli aggiornamenti).

UNI EN 614-1:2009	Sicurezza del macchinario - Principi ergonomici di progettazione - Parte 1: Terminologia e principi generali
UNI EN 614-2:2009	Sicurezza del macchinario - Principi ergonomici di progettazione - Parte 2: Interazioni tra la progettazione del macchinario e i compiti lavorativi
UNI EN 1005-1:2009	Sicurezza del macchinario - Prestazione fisica umana - Parte 1: Termini e definizioni
UNI EN 1005-2:2009	Sicurezza del macchinario - Prestazione fisica umana - Parte 2: Movimentazione manuale di macchinario e di parti componenti il macchinario
UNI EN 1005-3:2009	Sicurezza del macchinario - Prestazione fisica umana - Parte 3: Limiti di forza raccomandati per l'utilizzo del macchinario
UNI EN 1005-4:2009	Sicurezza del macchinario - Prestazione fisica umana - Parte 4: Valutazione delle posture e dei movimenti lavorativi in relazione al macchinario
UNI EN 1005-5:2007	Sicurezza del macchinario - Prestazione fisica umana - Parte 5: Valutazione del rischio connesso alla movimentazione ripetitiva ad alta frequenza
UNI EN ISO 10075 (parti da 1 a 3)	Principi ergonomici relativi al carico di lavoro mentale
UNI EN ISO 6385:2017	Principi ergonomici nella progettazione dei sistemi di lavoro
UNI EN ISO 9241-11:2018	Ergonomia dell'interazione uomo-sistema - Parte 11: Usabilità: Definizioni e concetti

UNI EN ISO 9241-210:2019	Ergonomia dell'interazione uomo-sistema - Parte 210: Processi di progettazione orientata all'utente per sistemi interattivi (ISO 9241-210:2019)
UNI EN ISO 9241-220:2019	Ergonomia dell'interazione uomo-sistema - Parte 220: Processi per abilitare, eseguire e valutare la progettazione orientata all'utente all'interno delle organizzazioni
UNI EN ISO 9241-971:2022	Ergonomia dell'interazione uomo-sistema - Parte 971: Accessibilità dei sistemi interattivi tattili/aptici
UNI EN ISO 14738:2009	Sicurezza del macchinario - Requisiti antropometrici per la progettazione di postazioni di lavoro sul macchinario
UNI EN ISO 26800:2011	Ergonomia - Approccio generale, principi e concetti
UNI EN ISO 27500:2017	Organizzazione orientata all'utente - Principi generali e logici
UNI ISO 11226:2019	Ergonomia - Valutazione delle posture statiche di lavoro
UNI ISO 11228-1:2022	Ergonomia - Movimentazione manuale - Parte 1: Sollevamento, abbassamento e trasporto
CEN ISO/TR 22411:2021	Ergonomics data for use in the application of ISO/IEC Guide 71:2014

3 TERMINI E DEFINIZIONI

Ai fini del presente rapporto tecnico si applicano i termini e le definizioni seguenti (vedere figura 1).

3.1 Esoscheletro antropomorfo: esoscheletro occupazionale a struttura cinematica rigida dove almeno un asse di rotazione della struttura del dispositivo è progettato per corrispondere (essere allineato) con un asse di rotazione dell'articolazione umana [1,2].

3.2 Esoscheletro a struttura cinematica rigida: esoscheletro occupazionale che ha una catena cinematica costituita da elementi rigidi che possono ruotare o traslare gli uni rispetto agli altri.

3.3 Esoscheletro attivo: esoscheletro occupazionale che utilizza attuatori elettromeccanici, pneumatici o idraulici che, attraverso l'azione combinata di sensori e sistemi di controllo, supportano il movimento umano in modo sinergico. Può fornire energia positiva netta durante il movimento umano, grazie all'azione degli attuatori [3, 4].

3.4 Esoscheletro non antropomorfo: esoscheletro occupazionale a struttura cinematica rigida dove nessun asse di rotazione del dispositivo è progettato per essere allineato ad un asse di rotazione dell'articolazione umana [1, 2].

3.5 Esoscheletro occupazionale: dispositivo indossabile portatile di servizio, che agisce sul corpo in modo meccanico, assistendo l'operatore durante un'attività lavorativa; un esoscheletro modifica le forze interne ed esterne che agiscono sul corpo e di conseguenza il carico biomeccanico dell'operatore, con lo scopo di supportarlo durante un'attività lavorativa mediante una forza o coppia assistiva.

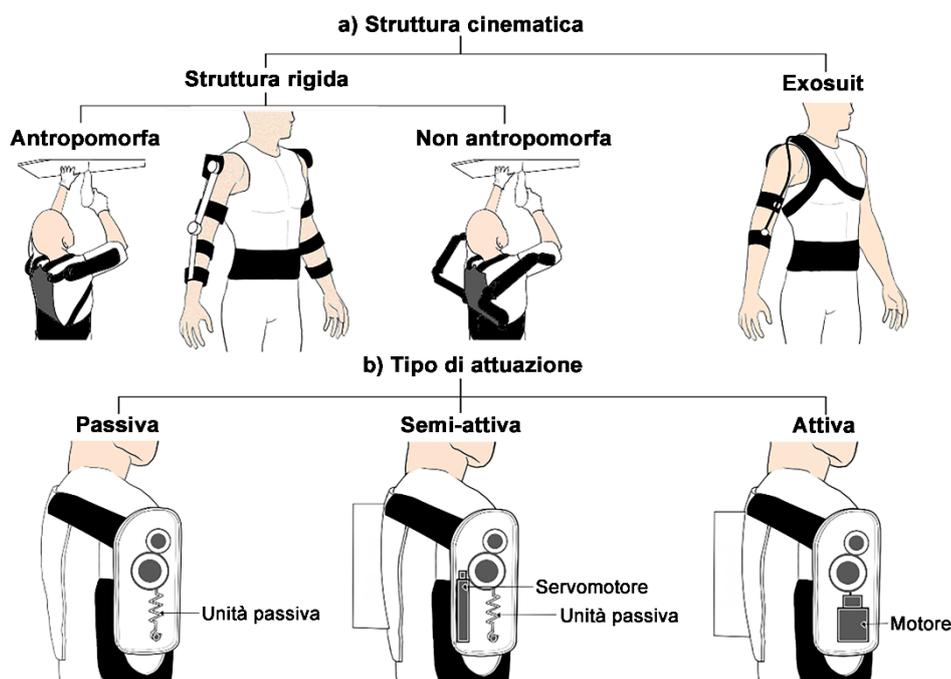
3.6 Esoscheletro passivo: esoscheletro occupazionale che sfrutta l'azione reattiva di elementi elastici che, accoppiati meccanicamente a più segmenti corporei, sono in grado di immagazzinare e rilasciare energia in varie fasi del movimento umano. L'energia positiva che riesce a fornire è uguale o inferiore all'energia che è immagazzinata negli elementi elastici [3 ,4].

3.7 Esoscheletro semi-attivo: esoscheletro occupazionale che utilizza servomotori (o frizioni azionate) a bassa potenza per regolare, innescare, o disinnesicare l'assistenza in base ad esigenze specifiche dell'utilizzatore. L'energia positiva che riesce a fornire è uguale o inferiore all'energia che è immagazzinata

negli elementi elastici (questi elementi attivi, come i servomotori o le frizioni, servono a modificare e modulare le proprietà elastiche o il sistema di trasmissione della struttura).

3.8 Exosuit o esoscheletri soft: esoscheletro occupazionale che non presenta una catena cinematica rigida; pertanto, non sono identificabili assi di rotazione del dispositivo bensì il dispositivo, mediante sistemi di trasmissione a cavi o tramite tessuti, esercita forze di trazione parallele all'azione dei complessi muscolo-tendinei [5, 6].

Figura 1 Illustrazione di esoscheletri occupazionali per arto superiore. Classificazione sulla base della struttura cinematica (a) e tipologia di attuazione (b) [7]



4 SICUREZZA E SALUTE NELL'USO DEGLI ESOSCHELETRI OCCUPAZIONALI ORIENTATI AD AGEVOLARE LE ATTIVITÀ LAVORATIVE

4.1 Caratteristiche degli esoscheletri occupazionali

Questa sezione ha l'obiettivo di descrivere le principali caratteristiche di un esoscheletro occupazionale, utili a valutarne l'idoneità in un contesto d'uso specifico. Queste caratteristiche, che dovrebbero essere riportate, ove pertinenti, dal fabbricante nelle istruzioni a corredo del dispositivo, includono:

- la destinazione d'uso (vedere punto 4.1.1);
- le caratteristiche tecniche (vedere punto 4.1.2);
- le evidenze scientifiche sull'efficacia del dispositivo (vedere punto 4.1.3).

4.1.1 Destinazione d'uso

La destinazione d'uso prevalente identifica l'utilizzo al quale è destinato un dispositivo secondo le indicazioni fornite dal fabbricante.

Le principali destinazioni d'uso previste per gli esoscheletri occupazionali sono relative al supporto delle attività lavorative caratterizzate da:

- movimentazione manuale dei carichi;
- movimenti ripetitivi dell'arto superiore;
- posture statiche.

4.1.2 Caratteristiche tecniche

Le caratteristiche tecniche, descritte nei punti da 4.1.2.1 a 4.1.2.7, sono le caratteristiche generali del dispositivo e quelle che ne identificano le funzioni.

4.1.2.1 Peso

Il peso complessivo e la distribuzione di questo sul corpo della persona giocano un ruolo importante nella percezione del carico da parte dell'utilizzatore. Pertanto, il peso di un dispositivo è valutato come combinazione dei seguenti fattori:

- peso complessivo del dispositivo;
- peso delle singole componenti e loro punti di scarico sui segmenti corporei;
- posizione del centro di massa del dispositivo rispetto al centro di massa dell'utilizzatore.

4.1.2.2 Ingombro

L'ingombro del dispositivo ne influenza l'usabilità, soprattutto in ambienti di lavoro particolari, quali per esempio, ambienti particolarmente angusti o ambienti in cui gli operatori lavorano a stretto contatto tra di loro o con altre attrezzature con le quali potrebbero interferire. L'ingombro di un esoscheletro è quantificabile rispetto al sistema di riferimento solidale al corpo della persona:

- ingombro laterale;
- ingombro superiore;
- ingombro frontale;
- ingombro posteriore.

4.1.2.3 Attuazione

È l'azione meccanica fornita da un dispositivo, ed è descritta da numerosi fattori, tra cui la modalità di attuazione, il profilo dell'assistenza, e l'ampiezza. Si considerano le caratteristiche nei punti da 4.1.2.3.1 a 4.1.2.3.5.

4.1.2.3.1 Modalità di attuazione

La modalità di attuazione può essere attiva, passiva e semi-attiva, come descritto nel seguito:

- attuazione attiva: l'azione assistiva è generata da attuatori elettromeccanici, pneumatici o idraulici e controllata da sistemi di controllo mediante le informazioni acquisite dai sensori;
- attuazione passiva: l'azione assistiva è generata dall'azione reattiva di elementi elastici che, accoppiati meccanicamente a più segmenti corporei, sono in grado di immagazzinare e rilasciare energia in varie fasi del movimento umano;
- attuazione semi-attiva: l'azione assistiva è generata dall'azione reattiva di elementi elastici che, accoppiati meccanicamente a più segmenti corporei, sono in grado di immagazzinare e rilasciare energia in varie fasi del movimento umano; in aggiunta, utilizzano servomotori (o frizioni azionate) a bassa potenza per regolare, innescare, o disinnescare l'assistenza in base ad esigenze specifiche dell'utilizzatore.

4.1.2.3.2 Autonomia

Nel caso di attuazione attiva o semi-attiva, l'autonomia è determinata dalla durata delle batterie necessarie al funzionamento del dispositivo. Nel caso di attuazione passiva l'autonomia ha durata teoricamente infinita.

4.1.2.3.3 Direzione della forza/coppia assistiva

La direzione della forza o coppia assistiva ha un effetto sull'entità e la direzione delle reazioni vincolari sul sistema muscoloscheletrico dell'utilizzatore. La direzione della forza o coppia assistiva è definita dalla struttura cinematica del dispositivo. La direzione della forza assistiva è definita rispetto al segmento corporeo su cui agisce (forza perpendicolare al segmento corporeo, forza parallela al segmento corporeo) e rispetto al piano di riferimento del corpo della persona (per esempio piano sagittale, frontale, trasverso).

4.1.2.3.4 Profilo ed ampiezza della forza/coppia assistiva

Nel caso di esoscheletro attivo, la forza/coppia assistiva può avere profilo ed ampiezza variabili e determinati dal sistema di controllo. Nel caso di attuazione passiva o semi-attiva, il profilo della forza/coppia assistiva è definito meccanicamente, quindi non modificabile, mentre l'ampiezza può essere variata manualmente dall'utilizzatore (attuazione passiva) o automaticamente da un servomotore (attuazione semi-attiva). L'ampiezza dell'azione assistiva può essere regolata su un numero predefinito di livelli oppure regolata tramite un sistema di regolazione continuo all'interno di un certo intervallo. L'ampiezza della forza assistiva può essere espressa come percentuale della forza di gravità agente sul giunto, che è compensata dall'azione del dispositivo.

4.1.2.3.5 Eventuali ulteriori caratteristiche

Ciascun dispositivo può inoltre presentare altre caratteristiche particolari di attuazione. A titolo di esempio, nei dispositivi attivi, il sistema di controllo può essere in grado di riconoscere il tipo di attività svolto dall'utilizzatore e quindi modulare l'azione assistiva; nei dispositivi passivi possono essere implementati meccanismi di blocco e sblocco dell'azione assistiva.

Per ulteriore approfondimento delle caratteristiche qualitative di un esoscheletro occupazionale vedere punto 4.6.1.

4.1.2.4 Struttura cinematica

La struttura cinematica è l'insieme di gradi di libertà e sistemi di trasmissione che permettono di ancorare il dispositivo sul corpo della persona e trasferire l'azione assistiva in modo efficace. Si vedano le definizioni di esoscheletri a struttura cinematica rigida (antropomorfi e non antropomorfi) o soft.

4.1.2.4.1 Struttura cinematica rigida

È costituita da elementi rigidi che possono ruotare o traslare gli uni rispetto agli altri.

- Esoscheletri antropomorfi. La struttura cinematica include almeno un asse di rotazione progettato per corrispondere (essere allineato) con un asse di rotazione dell'articolazione umana.
- Esoscheletri non antropomorfi. La struttura cinematica non prevede che uno o più assi di rotazione siano allineati ad un asse di rotazione dell'articolazione umana.

4.1.2.4.2 Struttura cinematica soft

Struttura in cui non sono identificabili assi di rotazione del dispositivo: il sistema di trasmissione è a cavi o utilizza tessuti, esercita forze di trazione parallele all'azione dei complessi muscolo-tendinei.

4.1.2.4.3 Gradi di libertà

A partire dalla struttura cinematica, possono essere definiti i gradi di libertà per i movimenti liberi dell'utilizzatore e quelli su cui agisce l'azione assistiva.

4.1.2.5 Taglie e regolazioni

Al fine di garantire un'efficace azione assistiva e comfort durante l'uso, è opportuno che l'interfaccia fisica uomo-macchina di un dispositivo indossabile preveda taglie e/o sistemi di regolazione che consentano di far aderire il dispositivo in modo efficace al corpo come un abito su misura.

4.1.2.6 Materiali

I materiali utilizzati per l'interfaccia fisica uomo-macchina ne influenzano il comfort. Caratteristiche quali la traspirabilità, lavabilità, durevolezza possono avere più o meno importanza a seconda del contesto d'uso.

4.1.2.7 Legislazione applicabile

Gli esoscheletri occupazionali sono soggetti alla legislazione nazionale vigente e alle direttive applicabili. Generalmente essi sono immessi sul mercato comunitario europeo come macchine¹.

4.1.3 Evidenze scientifiche sull'efficacia del dispositivo

Le evidenze scientifiche che caratterizzano l'efficacia di un esoscheletro occupazionale sono tra le informazioni importanti per la sua valutazione, non essendoci ad oggi metodologie specifiche condivise per la valutazione del rischio da sovraccarico biomeccanico riferibili a norme tecniche, buone prassi e linee guida.

4.2 Valutazioni sull'impiego degli esoscheletri occupazionali

Ad oggi sono stati condotti numerosi studi volti ad investigare l'efficacia degli esoscheletri occupazionali nel contesto lavorativo, e le possibili criticità connesse all'utilizzo degli stessi.

La maggior parte degli studi, a titolo di esempio, utilizza l'analisi del segnale elettromiografico di superficie (sEMG) dei principali gruppi muscolari coinvolti nell'esecuzione di particolare gesto lavorativo, con o senza esoscheletro.

Meno diffusi sono gli studi dedicati alla valutazione di specifici aspetti ergonomici (usabilità, accessibilità e accettazione da parte dell'utilizzatore).

Si tratta di indicatori di carattere ergonomico che non possono essere ignorati quando l'essere umano è chiamato a interagire con "oggetti" tecnologici di nuova concezione, che difficilmente possono essere compresi basandosi su dati e conoscenze desunti da analisi condotte in un contesto controllato come quello di laboratorio. L'interazione richiede molteplici conoscenze relative all'utilizzatore: non solo quelle relative alle caratteristiche del soggetto per il quale un prodotto è ideato, ma anche quelle ci informano delle sue preferenze e delle sue aspettative. In termini progettuali tutto questo, se correttamente considerato, si traduce nella realizzazione di prodotti complessi da un punto di vista tecnologico, ma facili da utilizzare, intuitivi e comprensibili nella loro gestione. L'utilizzatore diviene anch'esso un elemento fondamentale del processo di design. È facile comprendere quindi come una progettazione focalizzata sui soli aspetti della sicurezza o sui requisiti tecnologici da conferire al dispositivo, può ostacolare l'impiego di dispositivi indossabili.

In questa prospettiva, perché l'impiego di tali dispositivi come strumenti possa determinare benefici concreti, per ridurre il sovraccarico psico-fisico del lavoratore e di produttività, il design dovrà considerare tutti gli

¹ Alla data di pubblicazione del presente rapporto tecnico è in vigore la Direttiva 2006/42/CE che sarà sostituita dal Regolamento (UE) 2023/1230 a partire dal 20 gennaio 2027.

aspetti dell'interazione dell'uomo con il dispositivo indossabile, in termini di caratteristiche fisiche, cognitive e organizzative. Solo considerando tali prerogative nel loro insieme, è possibile garantire che il dispositivo risulti non soltanto usabile, ma anche accettato nello svolgimento del proprio lavoro quotidiano.

Un ulteriore aspetto da considerare è rappresentato dall'impatto che l'impiego di tali dispositivi ha sul modello organizzativo alla base del carico di lavoro. In questa prospettiva occorrerà considerare la necessità di rivedere i modelli di valutazione che attualmente sono impiegati per lo studio del rischio da sovraccarico biomeccanico.

Gli esoscheletri rappresentano quindi un nuovo possibile paradigma dei futuri contesti lavorativi in cui lavoratore e il dispositivo indossabile potrebbero formare complessi team uomo-macchina, che operano verso un obiettivo condiviso, dove la qualità dell'interazione determina il tipo di "relazione" e l'interfaccia il tipo di "personalità" del team stesso.

Se da un lato gli esoscheletri rappresentano un sistema per supportare le capacità umane, il loro impiego sistematico avrà l'effetto di condizionare, in modo non sempre prevedibile, il comportamento dell'utilizzatore e la natura dei compiti che è questi chiamato a svolgere, con potenziali ricadute ulteriori sull'organizzazione finale del lavoro. In quest'ottica una progettazione di tipo ergonomico, ponendo l'attenzione su questioni di carattere generale e sulle possibili conseguenze del non considerarle tutte, può aiutare a dare risposte concrete ai numerosi quesiti che l'uso di simili dispositivi pone, uno tra tutti cosa accade in caso di malfunzionamento.

Di seguito sono esaminati alcuni aspetti che dovrebbero essere considerati nell'uso di esoscheletri occupazionali, da tenere in considerazione al fine di esplorare tutte le possibili implicazioni, positive e negative, legate al loro uso di questi dispositivi indossabili.

4.3 Principi generali di progettazione e costruzione degli esoscheletri

4.3.1 Introduzione

L'accettabilità degli esoscheletri occupazionali in ambito lavorativo da parte dell'utilizzatore finale è un fattore di fondamentale importanza che dipende da diversi termini. L'efficacia nella riduzione dello sforzo fisico è importante, ma l'ergonomia del dispositivo non è da meno. Come il dispositivo si adatta sulla persona ed il comfort percepito sono altri fattori da considerare. Il comfort, infatti, è influenzato da diverse scelte progettuali e caratteristiche intrinseche dell'esoscheletro.

Le interfacce fisiche che permettono di mantenere la posizione desiderata dell'esoscheletro rispetto al corpo, sono una delle componenti principali che possono influenzare l'accettabilità del dispositivo da parte dell'utilizzatore. Solo grazie ad un attento studio applicato alle interfacce e al design delle componenti del dispositivo possiamo ottenere un buon comfort ed una buona efficacia nella trasmissione della forza.

Se, infatti, interfacce e design non sono stati ben progettati, si potrebbe avere una riduzione dell'efficienza anche del 50% dell'assistenza a causa del disallineamento dell'esoscheletro sul corpo [8]. Inoltre, le forze di assistenza trasmesse all'utilizzatore in maniera inefficace possono generare forze non previste come sforzi di taglio e fenomeni di compressione indesiderati [9]. Queste forze, chiamate parassite, creano disagio sull'utilizzatore, compromettendo l'accettabilità del dispositivo [10].

Un fattore, che potrebbe concorrere a questo tipo di disagio, potrebbe essere dovuto ad un grado di incompatibilità cinematica del dispositivo [11], impedendo all'utilizzatore un movimento naturale. La compatibilità/incompatibilità cinematica è una caratteristica del dispositivo dovuta alla particolare soluzione meccanica implementata. In linea generale, è fondamentale che gli esoscheletri (siano essi rigidi con catena cinematica antropomorfa o non antropomorfa, oppure anche soft) siano indossati correttamente (secondo

le indicazioni del fabbricante) perché le forze applicate sul corpo umano abbiano la direzione per la quale il dispositivo è stato progettato. Indossare in modo scorretto oppure una eventuale migrazione del dispositivo sul corpo umano (per esempio dopo un tempo prolungato di utilizzo, se non correttamente ancorato al corpo, potrebbe “scendere” per effetto della gravità) potrebbero portare ad applicare delle forze indesiderate sul corpo, provocando condizioni di disagio che nel tempo potrebbero generare dolori ed irritazioni cutanee. Alcuni esoscheletri sono equipaggiati con meccanismi di auto-allineamento o sistemi cinematici atti ad assorbire eventuali disallineamenti meccanici, riducendo così gli effetti indesiderati [8, 9, 10].

Il modo in cui l'esoscheletro e chi lo indossa si muovono e interagiscono tra loro è definito come adattamento dinamico. In linea di principio l'esoscheletro dovrebbe permettere all'utilizzatore di continuare a lavorare in modo naturale e ricevere assistenza fisica, al fine di ridurre il sovraccarico biomeccanico ovvero qualsiasi altro rischio dovuto all'interazione uomo-esoscheletro-ambiente di lavoro (vedere punto 4.6.2).

4.3.2 Norme di riferimento o strumenti per valutazione della usabilità e accettabilità

Nella pratica ergonomica le norme forniscono informazioni fondamentali per affrontare e risolvere molte questioni connesse all'interazione dell'uomo con i dispositivi tecnologici e gli ambienti dove essi operano, con particolare riguardo a quelle relative all'interfaccia utilizzatore, alle questioni organizzative e ai processi del ciclo di vita.

Allo stato presente non esistono ancora norme tecniche internazionali dedicate all'uso professionale degli esoscheletri. Ciò rappresenta un ostacolo significativo alla loro reale adozione in ambito occupazionale. Tuttavia, l'attuale panorama normativo offre diverse norme a carattere ergonomico nelle quale reperire utili informazioni per affrontare molte delle diverse questioni introdotte in precedenza. Si tratta di norme dedicate allo studio dei fattori umani basati su concetti che possono essere utilizzati dai differenti “attori” (per esempio dirigenti, manager, ingegneri e designer), che si occupano professionalmente della progettazione e della valutazione di compiti, lavori, prodotti, strumenti, attrezzature, sistemi, organizzazioni, per garantire che siano efficaci, efficienti e soddisfacenti da usare.

La tecnologia indossabile non dovrà possedere solo requisiti tali da risultare sicura, comoda e usabile, ma dovrà rispettare anche le istanze di accessibilità e accettabilità, fattori importanti da considerare per la diffusione di questi dispositivi sul posto di lavoro.

Di seguito è fornita una breve panoramica, non esaustiva, delle norme di carattere ergonomico, in cui sono raccolti e descritti principi e concetti fondamentali per realizzare una progettazione in grado di garantire l'integrazione ottimale dei requisiti e delle caratteristiche umane:

- a) Norme di carattere generale:
 - UNI EN ISO 26800:2011 “Ergonomia - Approccio generale, principi e concetti”
La norma descrive l'approccio generale all'ergonomia e specifica i principi e i concetti fondamentali dell'ergonomia applicabili alla progettazione e alla valutazione di compiti, lavori, prodotti, strumenti, attrezzature, sistemi, organizzazioni, servizi, strutture e ambienti. I principi e i concetti descritti nella UNI EN ISO 26800:2011 sono fondamentali per il processo di progettazione ovunque sia previsto il coinvolgimento umano, al fine di garantire l'integrazione ottimale dei requisiti e delle caratteristiche umane in un progetto.
- b) Norme di ergonomia per la progettazione e gestione di sistemi e attrezzature:
 - UNI EN ISO 27500:2017 “Organizzazione orientata all'utente - Principi generali e logici”
La norma presenta la logica e i principi generali della centralità dell'uomo che caratterizzano un'organizzazione centrata sull'uomo quali:
 - capitalizzare le differenze individuali come forza organizzativa;
 - rendere l'usabilità e l'accessibilità obiettivi aziendali strategici;

- adottare un approccio di sistema totale;
 - garantire che salute, sicurezza e benessere siano professionisti del business;
 - valorizzare i dipendenti e creare un ambiente di lavoro significativo;
 - essere aperti e affidabili; e
 - agire in modo socialmente responsabile. Essi forniscono un quadro di riferimento per il comportamento organizzativo quando i sistemi RIA sono considerati o implementati.
- UNI EN ISO 9241-220:2019 “Ergonomia dell'interazione uomo-sistema - Parte 220: Processi per abilitare, eseguire e valutare la progettazione orientata all'utente all'interno delle organizzazioni”
La norma descrive i processi e specifica i risultati legati ad una progettazione orientata all'utente realizzata all'interno delle organizzazioni il cui scopo è quello di soddisfare i requisiti di qualità orientati all'utente attraverso il ciclo di vita dei sistemi interattivi. I processi sono descritti dal punto di vista dei responsabili dell'analisi, della progettazione e della valutazione dell'interazione uomo-sistema.
- c) Norme dedicate all'accessibilità:
- UNI EN ISO 9241-971:2022 “Ergonomia dell'interazione uomo-sistema - Parte 971: Accessibilità dei sistemi interattivi tattili/aptici”
La norma fornisce requisiti e raccomandazioni ergonomiche generali e specifiche per sistemi interattivi tattili/aptici accessibili, comprese le interazioni tattili/aptiche accessibili, impiegati per aumentare l'accessibilità dei sistemi interattivi che fanno uso di modalità di input/output tattili/aptiche come, per esempio, gesti, vibrazioni e sistemi di percezione della forza applicata basati sul feedback. Essa fornisce una guida per le interazioni tattili/aptiche applicabile a una varietà di sistemi interattivi, comprese le tecnologie assistive.
 - CEN ISO/TR 22411:2021 “Ergonomics data for use in the application of ISO/IEC Guide 71:2014”
Il documento fornisce serie di dati che descrivono le caratteristiche funzionali, le capacità e le risposte di diversi utilizzatori. In particolare, ha una grande quantità di dati relativi agli utilizzatori più anziani. I dati possono essere usati per determinare i valori applicabili e le dimensioni che sono appropriate quando si progetta per la più ampia gamma possibile di utilizzatori, tenendo conto delle variazioni nei contesti specifici di utilizzo.
- d) Norme dedicate allo spazio di lavoro e carico di lavoro:
- UNI EN ISO 6385:2017 “Principi ergonomici nella progettazione dei sistemi di lavoro”
La norma stabilisce i principi fondamentali dell'ergonomia come linea guida per la progettazione dei sistemi di lavoro, secondo un approccio integrato alla progettazione dei sistemi di lavoro in cui gli ergonomi cooperano con gli altri soggetti coinvolti nella progettazione, con attenzione ai requisiti umani, tecnici e sociali, in modo equilibrato, durante l'intero processo.
 - UNI EN ISO 10075 (parti da 1 a 3) “Principi ergonomici relativi al carico di lavoro mentale”
I principi specificati nella serie UNI EN ISO 10075 (parti da 1 a 3) supportano la progettazione di condizioni di lavoro ottimali in termini di: prestazioni dei compiti, il carico di lavoro, il benessere umano, la sicurezza e la salute, focalizzando l'attenzione sul carico di lavoro mentale ed i suoi effetti, sui fattori tecnologici, economici, organizzativi e umani che influenzano le prestazioni e sul comportamento e il benessere delle persone come parte di un sistema di lavoro.
- e) Norme per il contesto e l'ambiente:
- UNI EN ISO 9241-11:2018 “Ergonomia dell'interazione uomo-sistema - Parte 11: Usabilità: Definizioni e concetti”
La norma fornisce un quadro per comprendere il concetto di usabilità e applicarlo a situazioni in cui le persone sperimentano o usano sistemi interattivi. L'usabilità è una misura scalabile, basata sul compito, del grado in cui gli utilizzatori sono in grado di raggiungere gli obiettivi in modo efficace, efficiente e con soddisfazione, tenendo conto del contesto d'uso. La norma spiega come l'usabilità può essere interpretata in termini di prestazioni umane e soddisfazione e sottolinea che

l'usabilità dipende dal contesto d'uso (le circostanze specifiche in cui un sistema, prodotto o servizio è sperimentato o usato).

Laddove l'esoscheletro occupazionale sia immesso sul mercato comunitario europeo come macchina, occorre considerare anche le norme tecniche² relative alla sicurezza del macchinario.

Quelle maggiormente significative sull'argomento sono UNI EN 614-1:2009, UNI EN 614-2:2009, UNI EN 1005-1:2009, UNI EN 1005-2:2009, UNI EN 1005-3:2009, UNI EN 1005-4:2009, UNI EN 1005-5:2007, UNI EN ISO 14738:2009.

4.3.3 Valutazione dell'impatto sull'indice di rischio del compito lavorativo: considerazioni generali

Vi è crescente interesse nel comprendere e prevedere come l'adozione di esoscheletri occupazionali possa influire sull'esposizione ai fattori di rischio associati al sovraccarico biomeccanico, ovvero quale possa essere l'impatto di un esoscheletro sul calcolo dell'indice di rischio di un compito lavorativo. In letteratura sono stati proposti approcci diversi per considerare per esempio l'effetto di un esoscheletro per il tronco su compiti di sollevamento manuale di carichi. Alcuni ricercatori hanno proposto di quantificare l'assistenza fornita dall'esoscheletro attraverso il calcolo di un "peso equivalente" percepito dall'utilizzatore, in virtù di una riduzione nell'attività dei principali gruppi muscolari coinvolti nell'attività di sollevamento carichi [12]. Un altro studio [13] suggerisce di utilizzare in prima analisi la coppia di estensione fornita dall'esoscheletro, per stimare di quanto si riduce il momento lombare (calcolato come peso sollevato per la distanza orizzontale tra spina dorsale e posizione del carico) e con esso il rischio di sovraccarico biomeccanico. In questi approcci, come in altri proposti per esoscheletri per arti superiori [14], la diminuzione del rischio da sovraccarico biomeccanico è collegata essenzialmente alla riduzione del segnale elettromiografico di superficie registrato durante attività assistite da esoscheletro. Mancano tuttavia studi epidemiologici longitudinali su larga scala che possano dimostrare, su un arco di tempo e un numero di lavoratori significativi, l'efficacia di un esoscheletro occupazionale nel ridurre l'insorgenza di disturbi muscolo-scheletrici e dunque l'impatto che questi dispositivi possono avere sul calcolo dell'indice di rischio di un compito lavorativo [15]. Tuttavia, la difficoltà di condurre tali studi, come evidenziato in un recente articolo da OSHA [1], pone la necessità di trovare metodi alternativi per comprendere i possibili effetti di lungo periodo di queste tecnologie e per il loro inserimento nella pratica lavorativa.

Ad oggi non esistono metodi per la valutazione del rischio da sovraccarico biomeccanico in attività assistite da esoscheletri che possano riferirsi a norme tecniche.

Considerando che potrebbero nascere nuovi metodi per il calcolo del rischio da sovraccarico biomeccanico con ausili esoscheletrici, è auspicabile che le attuali norme che affrontano il tema della valutazione del rischio siano revisionate e definiscano i principi fondamentali per la validazione di tali metodi.

La UNI ISO 11228-1:2022 riporta nello scopo e campo di applicazione che l'equazione NIOSH e gli indici che ne derivano non possono essere utilizzati per valutare il rischio di un compito di sollevamento in presenza di esoscheletri.

Come sottolineato in [16], l'esoscheletro determina una redistribuzione dei carichi sul corpo dell'utilizzatore, che dovrebbe essere valutata nel suo complesso. Sarà quindi necessario sviluppare nuove metodologie per valutare il rischio da sovraccarico biomeccanico che possano tenere conto della complessità dell'interazione uomo-esoscheletro-ambiente di lavoro in una prospettiva olistica.

² Alla data di pubblicazione del presente rapporto tecnico è in vigore la Direttiva 2006/42/CE che sarà sostituita dal Regolamento (UE) 2023/1230 a partire dal 20 gennaio 2027.

4.4 Misure organizzative e opportunità relative all'uso di esoscheletri occupazionali

Qualora fosse richiesto un miglioramento della postazione di lavoro da un punto di vista ergonomico, si suggerisce [17] la necessità di adottare soluzioni e misure preventive volte all'ottimizzazione della stessa a livello tecnico-organizzativo, prima di procedere con l'introduzione della tecnologia indossabile, che, per quanto comporti benefici per l'operatore e possa essere di aiuto per aumentare l'umanizzazione e la sostenibilità industriale, può anche introdurre rischi aggiuntivi. Si ricorda che l'adozione degli esoscheletri occupazionali per risolvere un problema di sovraccarico biomeccanico dovrebbe essere presa in considerazione, quando, per esempio, ricorra almeno una delle seguenti condizioni:

- altre misure preventive non siano attuabili, utilizzabili o efficaci;
- l'automazione dei compiti non sia fattibile;
- l'esecuzione del compito lavorativo non sia vincolata ad un luogo fisso;
- i compiti siano continuamente variabili, quali le attività di trasloco, lo scarico di carichi da container o la movimentazione dei pazienti.

Pensando alla progettazione degli stessi dispositivi e alla riprogettazione delle postazioni, è necessario introdurre il concetto di *Human-Centered Design* (HCD). Secondo la UNI EN ISO 9241-210:2019 "Ergonomia dell'interazione uomo-sistema - Parte 210: Processi di progettazione orientata all'utente per sistemi interattivi" (ISO 9241-210:2019), HCD definisce un approccio mirato a rendere i sistemi utilizzabili e utili, focalizzando l'attenzione sugli utilizzatori, sulle loro esigenze e requisiti, mediante l'applicazione delle conoscenze e delle tecniche relative a fattori umani, ergonomia e usabilità. È un metodo utile a migliorare il design fisico degli spazi lavorativi, integrando le persone, con la finalità di aumentarne il benessere e la produttività [16]. La progettazione si basa sullo studio e la comprensione degli utilizzatori, dei compiti svolti e del contesto di utilizzo. Gli utilizzatori stessi sono inclusi in un processo iterativo che coinvolge un team multidisciplinare in termini di competenze e prospettive a partire dalle prime fasi di progettazione e sviluppo, guidate e rifinite dalla valutazione *user-centered* e indirizzate all'esperienza utilizzatore nella sua globalità.

Attualmente, la selezione dell'esoscheletro più adatto è effettuata, valutando il lavoratore e il posto di lavoro. L'obiettivo è che abbia un fondamento scientifico, che sia oggettiva, orientata ai processi, pur mantenendo la sua flessibilità, al fine di trovare il giusto equilibrio tra le caratteristiche dell'esoscheletro, i requisiti della postazione di lavoro e delle mansioni del lavoratore.

Esiste un'ampia gamma di esoscheletri diversi, variabili per progettazione e modalità di costruzione e per il tipo di supporto fornito, così come sono diverse le loro implicazioni sia per l'utilizzatore, generando effetti fisici, fisiologici e cognitivi variabili, che per il processo di lavoro. È importante comprenderne le caratteristiche, per garantire il giusto accoppiamento tra la tipologia di esoscheletro scelto e le attività da supportare, l'antropometria dell'operatore e il disegno della postazione, al fine di ottenere un'adozione di successo.

Dunque, analizzare la routine lavorativa degli utilizzatori e la loro interazione con l'ambiente, oltre che per quantificare i rischi ergonomici, costituisce la base per valutare a priori se un esoscheletro possa avere un impatto positivo e significativo sulla qualità del lavoro e sulla salute del lavoratore.

In via preliminare, l'analisi della postazione di lavoro è fondamentale al fine di valutare l'adozione dell'esoscheletro unicamente qualora siano evidenti reali vantaggi derivanti dall'uso dello stesso. Questo determina un risparmio sull'impegno richiesto per sottoporre a prova gli esoscheletri in situazioni non adatte per la loro implementazione, quando, per esempio, il movimento da supportare copre solo una breve

porzione del turno, i movimenti sono altamente variabili e complessi, o l'ambiente non consente l'introduzione sicura di strumenti tecnologici aggiuntivi.

Propedeutico a questa valutazione potrebbe essere l'analisi degli effetti dell'esoscheletro occupazionale in termini di effettiva riduzione del carico su specifiche postazioni.

Una valutazione preliminare all'acquisto e all'introduzione dell'esoscheletro occupazionale potrebbe basarsi sui seguenti passaggi:

- analisi video della postazione che riporta criticità in termini di rischio da sovraccarico biomeccanico;
- analisi dell'organizzazione del lavoro e valutazione dei compiti ripetitivi (durata ciclo, durata effettiva turno, numero di pause, pausa mensa, durata compiti ripetitivi, numero delle unità prodotte);
- valutazione del rischio da sovraccarico biomeccanico con un sistema olistico in grado di valutare i rischi in maniera integrata (posture, forze, movimentazione manuale dei carichi e attività ripetitive degli arti superiori);
- confronto della valutazione del rischio nel caso "CON" esoscheletro e "SENZA" esoscheletro, così da evidenziare l'effetto del dispositivo indossabile e una eventuale riduzione del rischio della postazione di lavoro.

Tale valutazione dovrebbe essere ideata per fornire alle aziende un riferimento per valutare quantitativamente l'effetto del carico biomeccanico a seguito della riduzione determinata dal corretto utilizzo di uno specifico esoscheletro. I risultati di tale valutazione hanno impatti su:

- l'investimento economico in dispositivi indossabili a supporto del lavoro manuale;
- la riduzione del livello di affaticamento dell'operatore;
- il miglioramento della qualità del suo lavoro;
- incremento della produttività per l'azienda.

L'obiettivo è poter valutare:

- l'eventuale riduzione del carico in presenza di esoscheletro e quindi supportare l'introduzione dell'esoscheletro;
- l'eventuale riduzione del carico in presenza di esoscheletro, senza tuttavia garantire una situazione di assenza di rischio (in casi come questo è necessario ponderare l'introduzione di modifiche al metodo di lavoro);
- l'eventuale assenza di riduzione del carico dovuta a una erronea scelta dell'esoscheletro.

Dove la fase di indagine porta risultati positivi, l'azienda può valutare l'introduzione della tecnologia sullo specifico compito lavorativo, decisione che richiede modifiche, talvolta semplici, quanto necessarie, degli spazi e delle pratiche quotidiane. Fondamentale è il coinvolgimento di tutte le funzioni aziendali coinvolte, come il Servizio di Prevenzione e Protezione, gli uffici delle Risorse Umane, dei Tecnici di Produzione, di Analisi Lavoro e del Rappresentante dei lavoratori per la sicurezza.

E' necessario il preventivo coinvolgimento del Medico competente al fine anche di valutare la possibilità di attivare un protocollo precauzionale di sorveglianza sanitaria.

La riorganizzazione degli spazi dovrebbe prevedere l'installazione di spogliatoi o depositi dedicati per riporre i dispositivi indossabili. È necessaria l'organizzazione di corsi di formazione periodici, finalizzati ad istruire e monitorare i lavoratori sull'uso, conservazione, sanificazione e manutenzione corretti degli esoscheletri, analogamente a quanto avviene per esempio per i dispositivi di protezione individuale. In particolare, è

necessario che i lavoratori incaricati al loro uso dispongano di ogni necessaria informazione e istruzione e ricevano una formazione e un addestramento adeguati sulla base della legislazione vigente³.

4.5 Incidenza dei fattori di rischio responsabili del sovraccarico biomeccanico per la progettazione di un esoscheletro occupazionale

Un'attività lavorativa, specie se contraddistinta da fasi manuali, può sovraccaricare il sistema muscolo-scheletrico ed essere causa, nel medio-lungo periodo, dell'insorgenza di patologie muscolo-scheletriche. Le principali attività lavorative connesse al rischio da sovraccarico biomeccanico alle strutture muscolo-scheletriche sono:

- movimentazione e trasporto manuale dei carichi;
- attività di spinta e traino;
- attività con movimenti ripetitivi;
- attività in cui è richiesta l'adozione di posture lavorative non neutre, statiche/dinamiche;
- azioni ed attività con uso di forza.

Per ognuna delle attività sopra citate si possono individuare gli specifici fattori sui quali intervenire per ridurre il rischio da sovraccarico biomeccanico, in fase di progettazione del posto di lavoro (ergonomia preventiva) o nella fase di adeguamento/riprogettazione di una postazione di lavoro preesistente (ergonomia correttiva). Ai fini della progettazione di esoscheletri occupazionali utili indicazioni possono essere desunte dalla consultazione delle norme, con particolare riferimento a quelle della serie UNI ISO 11228, o alla UNI ISO 11226 o UNI EN 1005-4. Di seguito si elencano i principali fattori da considerare in funzione del distretto anatomico:

- 1) **Arti superiori:** per gli arti superiori, i fattori di rischio principali sono rappresentati da:
 - **frequenza:** la frequenza delle azioni tecniche è uno dei principali fattori responsabili del sovraccarico degli arti superiori. Implica una condizione di "velocità" dei movimenti necessari per eseguire l'attività lavorativa. Non sussistono limiti di soglia specifici, all'aumentare di questa variabile, il rischio cresce proporzionalmente;
 - **uso eccessivo di forza manuale:** la forza necessaria per compiere un lavoro svolto con gli arti superiori, a maggior ragione se richiede un'alta frequenza nella gestualità, dovrebbe essere rappresentato da uno sforzo muscolare minimo o molto leggero (tra 0,5 e 2 della scala Borg) [verificare se inserirlo nel glossario]
 - **posture incongrue:** in linea generale si può considerare incongrua una postura quando si supera il 50% del range articolare specifico per il distretto anatomico considerato, a maggior ragione se tale postura viene mantenuta per più di un terzo del tempo del ciclo di riferimento considerato. In particolare andrà considerato:
 - **il tipo di presa:** la condizione si può ritenere incongrua quando è richiesta una presa di precisione, con la punta di dita (presa in *pinch*), attuando la quale si riduce la capacità di prensione. Ulteriori criticità intervengono se, contestualmente, il polso è in estensione o in flessione. In quest'ultima condizione la forza di prensione si riduce fino al 25% della forza di *grip*;
 - **gomito:** attività che richiedono ripetute prono-supinazioni e/o flesso-estensioni del gomito con angoli superiori ai 60° vanno considerate a rischio, specialmente se coinvolte in attività ripetitive;
 - **polso:** condizioni critiche si determinano quando si opera con angoli di flessione o estensione del polso superiori a 45° di escursione angolare. Anche la deviazione ulnare e radiale risultano incongrue se sono maggiori di 20°. In entrambe le situazioni, si riduce notevolmente la forza di prensione dalla mano;

³ Alla data della pubblicazione del presente Rapporto Tecnico è in vigore il d. lgs. 81/08 e s.m.i. (Art. 73).

- la postura della spalla: in linea generale è necessario progettare i posti di lavoro e mansioni in modo tale che il lavoratore non sia costretto a operare con le braccia all'altezza spalle, anche per brevi periodi. Con riferimento alle norme UNI ISO 11226 e UNI EN 1005-4, condizioni critiche da un punto di vista posturale si determinano quando si opera con angoli di elevazione sul piano sagittale o di abduzione (elevazione sul piano frontale) del braccio superiori a 60°.
- carenza di adeguati tempi di recupero: per gli arti superiori occorre un recupero funzionale di 1 a 5 riferito ad un intervallo di lavoro massimo di 60 minuti (semplificando: 10 minuti di recupero ogni 50 minuti di lavoro ripetitivo). Il risultato ottimale per questo fattore di rischio lo si ottiene quando per tutte le ore lavorate esiste il recupero funzionale degli arti;
- fattori complementari di rischio: è necessario tenere presenti i fattori aggiuntivi che aumentano il rischio o rendono meno efficiente l'azione (utilizzo di strumenti vibranti, colpi con a mano, impiegare guanti che impacciano il movimento delle dita);

2) Rachide lombare:

- frequenza: la frequenza massima di movimentazione manuale dei carichi, definita dall'alternanza tra periodi con movimentazione e periodi in cui vengono svolte altre attività lavorative, non può superare la frequenza di 15 movimentazioni al minuto per compiti della durata massima di una ora e deve essere alternata con un periodo di recupero di durata almeno equivalente. Per quanto concerne il solo aspetto posturale occorre valutare sia l'entità degli angoli assunti durante l'attività lavorativa (angoli di flessione/estensione sul piano sagittale, di flessione laterale e di torsione) sia la frequenza con la quale la postura viene adottata. Al riguardo, condizioni di criticità si possono determinare quando una postura viene mantenuta staticamente, senza sostegno da parte di un supporto, o se adottata con una frequenza di movimento superiore alle 2 volte al minuto. In proposito si faccia riferimento alle indicazioni riportate nella UNI ISO 11226 o nella UNI EN 1005-4.
- peso massimo sollevabile calcolato secondo la UNI ISO 11228-1 a partire dal valore delle masse di riferimento (vedere prospetto 1 seguente):

Prospetto 1 – Valori delle masse di riferimento

Sesso	ETA' (in anni)		
	< 20	da 20 a 45	> 45
Maschi (kg)	20	25	20
Femmine (kg)	15	20	15

A questi riferimenti occorre aggiungere la massima cumulata giornaliera sollevata che non può essere maggiore di 6 000 kg nelle otto ore.

- durate di sollevamento - recupero funzionale: per il rachide lombare le durate di esposizione, e il rischio proporzionale, sono identificate dalla presenza di adeguati momenti di recupero funzionale come definito nella UNI ISO 11228-1.

Si distinguono quindi le condizioni critiche ad alto rischio e quelle accettabili a seconda dell'attività svolta, come riportato nel prospetto 2 seguente.

Prospetto 2 – Condizioni critiche ad alto rischio

Condizioni critiche ad alto rischio		
Sollevamento e trasporto	Traino o spinta	Compiti ripetitivi
La distanza orizzontale tra il corpo e il carico è maggiore della portata del braccio (>63 cm).	Necessità di usare forze massimali (≥ 8 sulla scala di Borg) per superare lo stato di fermo, accelerare, decelerare o mantenere il movimento.	Azioni tecniche anche di un solo arto talmente veloci da non poter essere contate con la semplice osservazione diretta.
Rotazione estrema del corpo (angolo > di 135° senza libertà di movimento dei piedi).	Tronco ruotato o piegato in modo significativo; mani al di fuori dell'ampiezza delle spalle; mani non davanti al corpo; mani al di sopra di 150 cm o al di sotto di 60 cm.	Una o entrambe le braccia operano col gomito all'altezza della spalla per il 50% o più della durata del compito.
Frequenza di sollevamento superiore a quella indicata per la durata del compito di sollevamento (per esempio: 8 sollevamenti al minuto per più di 120 minuti; 15 sollevamenti per compiti della durata massima di due ore).	Il pavimento è scivoloso (coefficiente di attrito dinamico minore di 0,40 μ) e presenta irregolarità determinate da buche e rotture (percorribilità).	Presa in punta di dita (pinch) per più dell'80% della durata del compito ripetitivo.
Presenza di carichi che superano i limiti per genere ed età (15-20-25 kg).	-	Picchi di forza (≥ 5 sulla scala di Borg) per il 10% della durata complessiva del compito ripetitivo.
Massa complessiva movimentata superiore ai limiti indicati per durata e distanza di cammino.	-	Una sola pausa in un turno di 6-8 ore.
Il percorso del sollevamento e trasporto prevede l'uso di scale.	-	Durata totale dei compiti ripetitivi maggiore di 8 ore.
Peso da 3 a 5 kg tenuto vicino al corpo, tra anche e spalle, senza asimmetria e per non più di 5 sollevamenti al minuto.	Necessità di usare forza minima (≤ 2 sulla scala di Borg), con mani tenute entro l'ampiezza delle spalle e davanti al corpo, tra anche e metà del torace, con tronco eretto (non piegato e non ruotato), per non più di 8 ore.	Il compito ripetitivo è eseguito per non più di 8 ore al giorno e con tutte le seguenti condizioni: gli arti superiori lavorano per meno del 50% del tempo della durata totale del compito ripetitivo; i gomiti sono al di sotto delle spalle per il 90% della durata totale del compito ripetitivo; non ci sono picchi di forza (maggiori di 5 nella scala di Borg); uso di forza moderata (3 o 4 sulla scala di Borg) per non più di 1 ora complessivamente; vi sono interruzioni utili di almeno 8-10 minuti ogni 2 ore oltre la pausa mensa; gli arti superiori non sono mai a contatto con materiali a temperature sotto lo zero gradi centigradi.
Peso da 5 a 10 kg tenuto vicino al corpo, tra anche e spalle, senza asimmetria e per non più di 1 sollevamenti al minuto	-	-
*Le condizioni ideali si verificano quando la postura è ideale (il baricentro del peso movimentato si trova ad un'altezza verticale non maggiore di 25 centimetri dalle nocche delle mani ed a una distanza orizzontale dalla colonna vertebrale non maggiore di 25 centimetri), la presa è buona in quanto non obbliga la mano a posture estreme, il peso è ben equilibrato e sollevato con entrambe le mani e le condizioni (micro)climatiche sono		

confortevoli (in particolare non calde).

- 3) Rachide cervicale: per quanto riguarda il tratto cervicale possono verificarsi condizioni critiche da quando il collo assume flessioni maggiori di 40° o se portato in estensione all'indietro, anche minima, in assenza di un sostegno da parte di un supporto. Come per il tratto lombare sono da evitare condizioni di postura statica o assunta con movimenti superiori a 2 volte al minuto.
- 4) Altre parti del corpo: per quanto riguarda gli altri segmenti corporei, la definizione di postura incongrua è legata allo specifico distretto anatomico e varia anche in funzione dell'assetto generale assunto dal corpo (se in piedi o in posizione seduta). In proposito si faccia riferimento alle indicazioni riportate nella UNI ISO 11226 o nella UNI EN 1005-4.

4.6 Valutazioni correlate all'uso degli esoscheletri occupazionali

4.6.1 Valutazione qualitativa delle caratteristiche del dispositivo indossabile

Nonostante i vantaggi derivanti dall'utilizzo di un dispositivo indossabile, l'applicazione di un esoscheletro in ambienti lavorativo pone alcune sfide. Queste dipendono dal tipo di dispositivo, dall'applicazione e dalla tecnologia utilizzata per il suo funzionamento.

Tra gli aspetti che incidono sulla valutazione complessiva di un dispositivo indossabile ve ne sono svariati di natura tecnica, ovvero relativi al design del dispositivo, così come alcuni relativi ad aspetti gestionali legati alle modalità di adozione.

Nei punti da 4.6.1.1 a 4.6.1.8 sono elencate ed argomentate le principali sfide in questo senso, ovvero gli aspetti tecnici, gestionali ed ambientali da tenere in considerazione per una corretta valutazione qualitativa del dispositivo.

4.6.1.1 Peso e ingombro

Il peso di un dispositivo indossabile è tra le discriminanti più impattanti per la sua valutazione e selezione. Il peso totale del dispositivo dipende chiaramente dai suoi componenti, dai materiali utilizzati e dalla tecnologia in esso implementata. Relativamente agli ingombri si suggerisce la selezione del dispositivo con ingombro compatibile con l'impiego previsto e accettabile dall'operatore, affinché questo non generi una sensazione di disagio nell'utilizzatore stesso e riduca il rischio di interferenza ed impatto con altre strumentazioni della postazione di lavoro o con il prodotto lavorato/assemblato. L'ingombro del dispositivo, in funzione del ciclo di lavoro da eseguire, può rappresentare un ostacolo allo svolgimento dell'attività lavorativa: a tal scopo occorre verificare che l'esoscheletro non introduca posture incongrue, in particolar modo se queste sono di tipo statico oppure occorrono durante un compito di movimentazione manuale dei carichi.

Peso ed ingombro impattano in modo immediato sul confort del dispositivo, il quale, nel caso di lavoratore che svolge attività ciclico ripetitiva, verrà utilizzato per l'intero turno di lavoro.

4.6.1.2 Livello di assistenza: tipologia e regolazione

La valutazione di un dispositivo indossabile dovrebbe passare anche attraverso l'adattabilità a tutti i tipi di utilizzatori; pertanto, dovrebbe essere garantita la possibilità di adeguare, in maniera continua o discreta, il livello di assistenza fornita dall'esoscheletro in funzione delle caratteristiche fisiche dell'utilizzatore e del compito lavorativo da svolgere. Riportando l'esempio di esoscheletro passivo di arto superiore, questo dovrebbe permettere l'aggiustamento semplice ed immediato da parte dell'utilizzatore dei livelli di supporto forniti dall'esoscheletro. Le modalità di settaggio del livello di assistenza dovrebbero essere indicate dal fabbricante del dispositivo e riportate nel libretto di uso e manutenzione: in questo dovrebbe essere riportato il numero di livelli di assistenza disponibili e le indicazioni per la corretta selezione del livello di assistenza in funzione di parametri oggettivi (per esempio peso e altezza utilizzatore, caratteristiche del task lavorativo).

Nel caso di esoscheletri attivi è necessario valutare la compatibilità tra la durata della batteria e la durata del compito lavorativo e conoscere la sorgente dell'assistenza (elettrica/pneumatica) ed il profilo assistivo. Inoltre, laddove presente, è importante escludere la possibilità di interferenza, fisica e non, tra la sensoristica a bordo dell'esoscheletro e la postazione di lavoro, gli indumenti di lavoro e le attrezzature previste del ciclo di lavoro. In conclusione, si suggerisce generalmente la selezione di un dispositivo che garantisca una possibilità di regolazione del livello di assistenza in maniera facilmente determinabile ed autonomamente impostabile.

4.6.1.3 Vestibilità e taglie: tipologia e regolazione

La adattabilità di cui al punto 4.6.1.2 è declinata anche in termini di vestibilità e possibilità di selezione e regolazione della taglia del dispositivo. Infatti, l'adattabilità è un aspetto chiave in grado di influenzare la percezione del comfort di chi lo indossa ed il corretto funzionamento dell'esoscheletro. Dovrebbe essere innanzitutto valutata la vestibilità ed il confort delle parti direttamente a contatto con l'utilizzatore: generalmente gli esoscheletri per arto superiore sono caratterizzati da una struttura soft che replica uno zaino, ovvero composta da spallacci e cintura in vita. Talvolta è presente un supporto rigido lungo la colonna, in altri casi questo è assente. Pertanto, dovrebbe essere valutata la forma della componente soft dell'esoscheletro e la sua vestibilità in relazione al compito lavorativo e all'eventuale interferenza con il vestiario di lavoro. In secondo luogo, dovrebbe essere verificata la disponibilità di diverse taglie che siano in grado di gestire la differenza antropometrica e di genere della popolazione lavorativa. Il numero di taglie disponibili, unitamente alla guida per la loro selezione, dovrebbe essere indicato dal fabbricante nel libretto di uso e manutenzione del dispositivo. Infine, è necessario valutare che tutte le regolazioni infra-taglia, che saranno necessarie al primo utilizzo dell'esoscheletro, siano semplici da impostare e mantengano il loro settaggio iniziale anche a seguito di molte ore di utilizzo: questo fattore è importante per garantire il corretto funzionamento dell'esoscheletro durante il turno di lavoro, nonché per evitare che il lavoratore debba preoccuparsi di riaggiustare il settaggio della taglia durante il compito lavorativo, incidendo negativamente sulla sua produttività. Inoltre, le operazioni di vestizione/svestizione del dispositivo dovrebbero essere semplici da effettuare in autonomia ed in un tempo congruo alle necessità della postazione di lavoro ed alla tipologia di organizzazione del lavoro.

4.6.1.4 Materiali: traspirabilità, igiene e condizioni ambientali del posto di lavoro

La scelta dei materiali influenza fortemente la capacità dell'esoscheletro di supportare chi lo indossa a svolgere i compiti richiesti. Costo, peso e facilità di fabbricazione sono tre fattori principali che guidano questa scelta. Per quanto riguarda le parti meccaniche degli esoscheletri, nonché quelle funzionali e portanti, a parità di pezzo, l'acciaio è più pesante dell'alluminio ma ha una migliore resistenza alla fatica; materiali come le fibre di carbonio e il titanio sono più leggeri ma più costosi. Per quanto riguarda la parte "soft" dell'esoscheletro a diretto contatto con l'utilizzatore, è fondamentale preferire materiali lavabili e traspiranti. Un tessuto lavabile, e quindi una struttura sfoderabile, è necessario sia nel caso in cui il dispositivo venga considerato ad uso personale (per garantirne la corretta pulizia in particolar modo nelle stagioni calde), sia nel caso in cui il dispositivo sia assegnato alla postazione di lavoro (per garantire l'igiene nel passaggio da un lavoratore all'altro). Se l'utilizzo del dispositivo è previsto in un ambiente di lavoro con temperature molto basse o alte, oppure si prevede che l'esoscheletro verrà in contatto con prodotti lavorati o attrezzature molto calde o fredde, è necessario assicurarsi che non sussista il rischio di trasmissione del calore alterato alla pelle del lavoratore, oppure prevedere adeguato isolamento. Occorre verificare inoltre che l'uso dell'esoscheletro non aggravi le condizioni di stress fisico in termini di temperatura e umidità ambientale.

4.6.1.5 Potenziali pericoli di natura meccanica nell'utilizzo e situazioni di emergenza (vedere punto 4.6.2)

Un'attenta valutazione dovrebbe riguardare i possibili pericoli di natura meccanica del dispositivo. In particolare, verificare che il movimento delle parti del dispositivo sia limitato e non rischi di arrecare danno al prodotto assemblato/lavorato, nonché rappresentando un rischio per l'utilizzatore. Verificare inoltre l'assenza di parti taglienti o tali da creare compressioni localizzate nel contatto con il corpo dell'utilizzatore. È importante assicurarsi che i sistemi di chiusura di spallacci e cinture dell'esoscheletro siano compatibili con l'usuale abbigliamento di lavoro dell'utilizzatore (per esempio che il velcro non possa accidentalmente agganciarsi agli indumenti di lavoro, rappresentando un ostacolo alla procedura di vestizione/svestizione). Occorre verificare che l'uso dell'esoscheletro non introduca ulteriori rischi per la sicurezza sul luogo di lavoro. Può essere opportuno selezionare dispositivi che abbiano la possibilità di disattivare le parti meccaniche attive con appositi blocchi di sicurezza che garantiscano all'utilizzatore il totale controllo sul dispositivo stesso, anche quando questo non è in uso ma è indossato in posizione di riposo. Infine, la possibilità di sganciare velocemente, in caso di emergenza, le parti attive dell'esoscheletro permettendo all'utilizzatore di mettersi in sicurezza senza alcuna restrizione o ingombro nei movimenti dovrebbe essere presa in considerazione tra i parametri di selezione e valutazione del dispositivo.

4.6.1.6 Manutenzione

È necessario programmare e verificare la corretta esecuzione di appropriati interventi di manutenzione e verifica dell'integrità delle parti meccaniche del dispositivo. Le modalità di esecuzione e le frequenze di detti interventi dovrebbero essere indicate dal fabbricante del dispositivo nel libretto di uso e manutenzione del dispositivo. L'attività manutentiva condotta dovrebbe essere svolta da persona competente e riportata dall'utilizzatore su un apposito registro di controllo.

4.6.1.7 Valutazione tramite utilizzo sperimentale

Per dispositivi commerciali si può effettuare, in prima battuta, una valutazione tramite utilizzo sperimentale limitato nel tempo, direttamente in ambiente produttivo. In questo contesto, è importante prevedere un protocollo di prova che preveda una fase di comunicazione del dispositivo, una di addestramento all'uso, una fase di utilizzo e, infine, una di valutazione dell'esperienza.

Di seguito una descrizione tipo delle principali fasi che caratterizzano un protocollo di prova:

- 1) La prima fase vede il coinvolgimento delle figure interessate all'interno dell'organizzazione, prevede una comunicazione efficace del dispositivo tramite il coinvolgimento del fornitore o produttore del dispositivo indossabile; in questa fase si possono eventualmente raccogliere le adesioni volontarie da parte degli utilizzatori interessati.
- 2) La fase di addestramento prevede sessioni individuali tra fornitore/produttore ed utilizzatore focalizzate alla fornitura pratica di istruzioni e dimostrazioni di utilizzo.
- 3) La fase di utilizzo del dispositivo è da condursi nell'ambito della usuale attività lavorativa dell'utilizzatore avendo cura di prevedere un utilizzo incrementale nel tempo (per esempio numero di ore di utilizzo incrementale nei giorni).
- 4) La fase finale prevede la somministrazione, tramite interviste semi strutturate, di questionari atti a valutare usabilità ed accettabilità del dispositivo in valutazione.

4.6.1.8 Adeguatezza al ciclo di lavoro ed alle attività secondarie/accessorie

La valutazione qualitativa delle caratteristiche di un dispositivo indossabile risulta essere particolarmente dipendente dall'attività lavorativa per la quale si intende adoperare il dispositivo. A tale scopo, è bene verificare che il ciclo non presenti una variabilità di operazioni e posture talmente ampia da rendere il dispositivo adeguato solo per una minima parte del ciclo di lavoro ed inadeguato per l'esecuzione di tutte le

altre attività a ciclo o accessorie. In quest'ottica e laddove l'organizzazione del lavoro lo permetta, è necessario verificare che il layout della postazione di lavoro permetta eventualmente la vestizione o svestizione agevole del dispositivo quando non necessario, e che non vi siano interferenze con prodotti o attrezzature, ovvero che siano garantiti adeguati spazi per i movimenti.

4.6.2 Interazione uomo-esoscheletro-ambiente di lavoro

4.6.2.1 Generalità

È importante sottolineare che l'utilizzo di un esoscheletro nell'ambiente di lavoro introduce elementi di attenzione in materia di salute e sicurezza del lavoratore da analizzare e che richiedono una valutazione dei rischi specifica dell'interazione uomo-esoscheletro-ambiente di lavoro. La valutazione dovrebbe comprendere sia i rischi intrinseci dell'esoscheletro scelto sia quelli che derivano dall'interazione di tale esoscheletro con l'attività di lavoro (anche come compiti secondari) che l'utilizzatore dovrà svolgere e con l'ambiente di lavoro in cui l'utilizzatore andrà ad operare.

È opportuno altresì sottolineare che la valutazione dovrebbe analizzare i rischi che possono presentarsi durante regolari condizioni di utilizzo o essere generati da condizioni di malfunzionamento o guasto di alcuni componenti, di regolazione inappropriata o di uso errato del dispositivo da parte dell'utilizzatore. I rischi possono riguardare l'utilizzatore stesso o persone terze, quali colleghi di lavoro o tecnici preposti alla regolazione e/o manutenzione dei dispositivi.

La scelta di un esoscheletro adeguato alle caratteristiche dell'utilizzatore, dell'attività e dell'ambiente di lavoro, unitamente alla formazione e addestramento dell'utilizzatore risultano fondamentali per mitigare il rischio. Risulta comunque importante monitorare, anche tramite il medico competente, l'accettabilità del dispositivo valutandone gli aspetti di comfort, fastidi/dolori in zone specifiche, sensazioni di fatica, riduzione dei movimenti e possibili reazioni cutanee. Gli effetti andrebbero valutati nel breve periodo e a più lungo termine.

Negli ultimi anni sono stati pubblicati numerosi documenti a livello europeo e internazionale [17, 18, 19, 20, 21, 22 e 23] per supportare i produttori di esoscheletri e gli utilizzatori nel comprendere e valutare i rischi legati all'introduzione di un esoscheletro in ambiente lavorativo. I documenti concordano nel suddividere i rischi in base alla loro natura prevalente. I prospetti da 3 a 5 e il punto 4.6.2.2, riportano in estrema sintesi i rischi così suddivisi:

- Rischi meccanici o legati all'interazione con l'ambiente di lavoro/emergenze;
- Rischi legati alla sfera fisica/fisiologica;
- Rischi legati alla sfera cognitiva e al carico mentale;
- Ulteriori rischi.

L'elenco fornito non è da considerarsi esaustivo; l'ordine di elenco non è legato alla rilevanza del rischio.

Prospetto 3 - Rischi meccanici o legati all'interazione con l'ambiente di lavoro/emergenze

PIZZICAMENTO/SCHIACCIAMENTO	Parti mobili dell'esoscheletro possono causare pizzicamento/schiacciamento di parti del corpo (per esempio le dita) o impigliare indumenti o capelli.
SFREGAMENTI/ABRASIONI/TAGLI	Parti mobili dell'esoscheletro o movimenti relativi tra esoscheletro e utilizzatore possono causare sfregamenti ripetuti, irritazioni o tagli che, nei casi più gravi, possono generare lesioni più profonde.
GUASTI E CEDIMENTI	Le parti meccaniche o gli elementi di ancoraggio dell'esoscheletro all'utilizzatore (per esempio gli spallacci) possono cedere per sovraccarico, fatica o corrosione.

RUMORE E VIBRAZIONI	Parti mobili e meccanismi interni all'esoscheletro, specie se attivo, possono generare rumore e vibrazioni
COLLISIONE	L'ingombro dell'esoscheletro richiede spazi di movimento maggiori e può causare interferenza/collisione con altri soggetti o elementi dell'ambiente di lavoro. Parti dell'esoscheletro possono rimanere impigliate in altri macchinari.
CADUTE	L'esoscheletro può rappresentare un rischio aggiuntivo in caso di cadute accidentali dell'utilizzatore. Sono da valutare il danno che l'esoscheletro può causare all'utilizzatore nell'impatto con il terreno, nonché la possibilità per l'utilizzatore di rialzarsi da solo in caso di caduta.
SITUAZIONI DI EMERGENZA	L'esoscheletro può determinare un possibile ritardo nella risposta alla gestione di emergenze, come l'evacuazione del posto di lavoro o la svestizione da parte di terzi in caso di malore dell'utilizzatore. Sono da valutare la possibilità per l'utilizzatore di togliersi autonomamente e celermente l'esoscheletro in caso di pericolo nonché che risulti possibile a terzi svestire l'utilizzatore in caso questi sia da soccorrere.
COMPATIBILITA'	La compatibilità dell'esoscheletro prevede una valutazione in senso ampio rispetto all'ambiente di lavoro, ai metodi e ai tempi di lavoro (anche per i compiti secondari). Sono da valutare anche le condizioni ambiente (temperatura e umidità), l'eventuale presenza di sostanze che possano reagire con i materiali di costruzione dell'esoscheletro o di campi elettromagnetici che possano interferire con i sistemi di controllo dell'esoscheletro. Occorre inoltre valutare eventuali interazione/incompatibilità con il normale vestiario da lavoro e con altri dispositivi di protezione individuale.

Prospetto 4 - Rischi legati alla sfera fisica/fisiologica

RIDISTRIBUZIONE DEI CARICHI	La struttura dell'esoscheletro può determinare un trasferimento dei carichi, ovvero ridurre il carico biomeccanico che graverebbe in assenza di esoscheletro sulle zone del corpo supportate in modo specifico dall'esoscheletro ma generare sollecitazioni aggiuntive su altre zone del corpo (tipicamente il bacino e gli arti inferiori). Gli effetti nel medio-lungo termine di questa ridistribuzione non sono ad oggi noti né riguardo alle sollecitazioni aggiuntive né al supporto costante.
PESO DELL'ESOSCHELETRO	Il peso dell'esoscheletro può generare un carico biomeccanico statico importante che è da valutare, unitamente a un possibile spostamento del baricentro dell'utilizzatore con ripercussioni negative sull'esecuzione dei movimenti e sull'equilibrio.
COMPRESSIONI LOCALIZZATE	Parti dell'esoscheletro a contatto con l'utilizzatore e gli stessi elementi di ancoraggio (es spallacci e velcri) possono determinare compressioni localizzate, con riduzione del flusso sanguigno
CINEMATICA ARTICOLARE	La presenza dell'esoscheletro può alterare la cinematica articolare, riducendo i gradi di libertà fisiologici dell'utilizzatore o al contrario, nel caso di esoscheletri attivi, forzando ampiezze di movimento maggiori di quelle che utilizzerebbe l'utilizzatore.
ALTERAZIONE SENSORIALE	L'esoscheletro può alterare la percezione di sé e dello spazio con il rischio di un minor controllo dei movimenti da parte dell'utilizzatore e di situazioni di equilibrio precario, statico e dinamico, che possono causare posture scorrette o che determinano un maggior carico sui muscoli posturali o sui muscoli antagonisti.
IGIENE	L'esoscheletro può generare dermatiti da contatto legate ai materiali utilizzati o all'interazione di questi con l'ambiente di lavoro. Le problematiche di pulizia/disinfezione divengono particolarmente rilevanti in caso di esoscheletro assegnato alla postazione e condiviso da più utilizzatori.

CALORE	L'esoscheletro può causare un aumento della temperatura corporea e una maggior difficoltà di smaltire il sudore. Specie per esoscheletri attivi, esiste la possibilità che alcune parti possano surriscaldarsi durante l'uso o generare calore.
--------	---

Prospetto 5 - Rischi legati alla sfera cognitiva e al carico mentale

METODO DI LAVORO	L'utilizzo di un esoscheletro può determinare modifiche del metodo di lavoro e della strategia di movimento con riflessi sul carico mentale. Sono da valutare anche gli effetti dell'esoscheletro sul ritorno sensoriale che guida l'utilizzatore nel completamento del suo lavoro.
LIVELLO DI ATTENZIONE	L'utilizzo di un esoscheletro può aumentare il carico mentale a causa di una maggiore attenzione richiesta all'utilizzatore nell'esecuzione del compito assistito dall'esoscheletro, specie se attivo.
SISTEMI DI CONTROLLO	La complessità dei sistemi di controllo, specie negli esoscheletri attivi, può causare un aumento di ansia nell'utilizzatore rispetto al rischio di errata/involontaria attivazione, fraintendimento di uso, malfunzionamento o guasto dei sistemi di sicurezza.
FATTORI PSICO-SOCIALI	L'esoscheletro può essere vissuto come stigma rispetto alle proprie capacità fisiche o come elemento di isolamento.
PERDITA DI CONTROLLO	Il lavoro assistito da esoscheletro può essere percepito come perdita di autonomia e di controllo sul proprio lavoro.
OBBLIGATORIETA'	Anche se volontario, l'utilizzo dell'esoscheletro può essere percepito come imposto o forzato anche a causa della pressione tra pari.

4.6.2.2 Ulteriori rischi

Sono poi da considerare, per esempio, i rischi legati alla presenza di fluidi eventualmente in pressione o infiammabili, i rischi legati a guasto o malfunzionamento delle batterie o di altri componenti elettrici (durante uso o manutenzione), i rischi legati a possibili radiazioni emesse dall'esoscheletro.

4.7 Settori di applicazione degli esoscheletri occupazionali

In recenti lavori di review, sono stati descritti più di 30 diversi esoscheletri occupazionali. Questi esoscheletri sono stati sviluppati principalmente per sostenere l'operatore nel mantenimento di posture di lavoro incongrue, co-adiuvare l'operatore durante il sollevamento e la movimentazione di carichi, ridurre l'affaticamento muscolo scheletrico e nervovascolare durante movimenti ripetuti ad alta frequenza, poter sollevare carichi superiori a quelli generalmente sollevabili. Inoltre, sono state elencate alcune attività lavorative specifiche, come il sollevamento e trasferimento pazienti, lavori edili, agricoli e lavori di carpenteria in quota.

Nell'ambito automobilistico vi sono stati molti studi di valutazione degli esoscheletri occupazionali. Infatti, nell'industria dell'automobile ci sono operazioni manuali che richiedono per l'operatore un supporto fisico

quali, a titolo di esempio non esaustivo: saldatura, verniciatura, assemblaggio, montaggio dell'abitacolo, del sottoscocca, porte, finestre o finiture e sigillatura delle porte. Queste operazioni sono eseguite spesso a ritmi elevati⁴ e in alcuni casi richiedendo il mantenimento di posture incongrue durante l'esecuzione di azioni ad alta precisione. Di recente, diverse case automobilistiche hanno valutato e sottoposto a prova gli esoscheletri all'interno dei loro impianti, sviluppando in alcuni casi dispositivi personalizzati per soddisfare esigenze specifiche [24, 25, 26, 27 e 28].

Un recente studio ha analizzato il potenziale utilizzo degli esoscheletri nell'ambito delle costruzioni civili [29]. In questo studio sono state valutate le prospettive sull'adozione di esoscheletri e sull'uso continuato nella pratica. Lo studio conclude con una indicazione di massima sulla potenzialità di utilizzo degli esoscheletri per compiti ripetitivi o che coinvolgono la movimentazione di materiali pesanti, lavori in quota, lavori di tinteggiatura ecc. Tuttavia, sono stati osservate reticenze all'ipotesi di utilizzo a causa dell'efficacia ancora non comprovata nello specifico campo di applicazione per quanto riguarda la salute, sicurezza, usabilità, ritorno sull'investimento, ecc. Ciononostante, migliorando la cultura e conoscenza degli esoscheletri, considerando che l'incidenza di disturbi muscoloscheletrici nell'ambito delle costruzioni edili [30] è molto elevata, è facile poter ipotizzare che questo settore, sia uno dei più promettenti per una futura adozione di questi dispositivi che potrebbero davvero diventare un valido supporto anche in considerazione dell'invecchiamento della forza lavoro [31], aspetto, con cui tutto il mondo della sicurezza, dovrebbe iniziare a confrontarsi seriamente.

In sintesi, si riportano nel prospetto 6 seguente gli ambiti di lavoro (automobilistico, manifatturiero, nautica, logistica, costruzione edile, alimentare, agricoltura, servizi di igiene e pulizia industriale, e assistenza sanitaria ecc.) e le mansioni per le quali sono stati sperimentati esoscheletri in un contesto industriale operativo durante l'effettiva attività lavorativa.

⁴ Si fa osservare che per lo sviluppo di auto di piccole dimensioni, i cicli di lavoro potrebbero anche risultare di pochi minuti con un impatto sulla frequenza del lavoro impattante sulla salute del lavoratore.

Prospetto 6 - Esempi di Settori industriali e fattori di rischio in cui gli esoscheletri occupazionali sono stati sperimentati in ambiente operativo per dare un supporto

Settore industriale	Attività specifica	Mansioni lavorative	Fattori di rischio fisico	Fattori di rischio ambientale ed organizzativo	Incidenza a MSD	Esoscheletro utilizzato	Sessione sperimentale, numero soggetti	Durata della prova	Valutazione & Efficacia riscontrata	Riferimenti bibliografici
Automobilistico	Assemblaggio abitacolo e componenti	Inserimento e assemblaggio di parti di autoveicoli, con sollevamenti di oggetti dal peso variabile (fino a 15 kg)	Posizioni ergonomiche incongrue Movimenti altamente ripetitivi Sollevamento carichi	Ritmi di lavoro Attività ripetitive Attività monotona	Apparato dorso-lombare	Esoscheletro a supporto schiena	30 lavoratori	Da due ore per giorno a intero turno di lavoro, 1 mese di sperimentazione	Questionari, è stata valutata l'accettazione del dispositivo con risultati buoni per attività statiche. In attività dinamiche l'usabilità risulta scarsa.	32
	Assemblaggio abitacolo	Assemblaggio di parti di autoveicoli in linea	Posizioni ergonomiche incongrue	Ritmi di lavoro Attività ripetitive Attività monotona	Apparato dorso-lombare	Esoscheletro a supporto schiena	10 lavoratori	2 giorni di prova	Misure EMG, riduzione del 24% dell'attività erettori spinali	33
	Saldatura	Saldatura di parti di autoveicoli in	Posizioni ergonomiche	Ritmi di lavoro	Apparato arti superiori	Esoscheletro a	6 lavoratori,	1 ora di prova	Misure EMG, riduzione del deltoide del	34

		catena di montaggio	he incongrue Movimenti altamente ripetitivi	Attività ripetitive Attività monotona Microclima ambientale		supporto braccia			20% e sempre sotto il valore di Soglia del rischio ridotto del 50% (40%MVC e 10%ciclo).	
	Verniciatura	Verniciatura di parti di autoveicoli in catena di montaggio	Posizioni ergonomiche incongrue Movimenti altamente ripetitivi	Ritmi di lavoro Attività ripetitive Attività monotona Microclima ambientale	Apparato arti superiori	Esoscheletro a supporto braccia	6 lavoratori	1 ora di prova.	Misure EMG, riduzione del deltoide del 20% e riduzione del valore di Soglia del rischio del 30% (40%MVC e 10%ciclo).	34
	Assemblaggio sottoscocca	Assemblaggio parti di autoveicoli sottoscocca	Posizioni ergonomiche incongrue Movimenti altamente ripetitivi Sollevamento carichi	Ritmi di lavoro Attività ripetitive Attività monotona	Apparato arti superiori	Esoscheletro a supporto braccia	12 lavoratori,	2 giorni di prova	Misure EMG, riduzione del deltoide del 24% e 18% trapezio. No restrizioni di movimento, e non modifiche sulla performance lavorativa	35

Assemblaggio sottoscocca	Assemblaggio parti di autoveicoli sottoscocca	Posizioni ergonomiche incongrue Movimenti altamente ripetitivi	Ritmi di lavoro Attività ripetitive Attività monotona	Apparato arti superiori	Esoscheletro a supporto braccia	10 lavoratori	3 mesi di prova.	Questionari, riduzione della forza percepita dal lavoratore del 40%. Riportate problematiche e sul disagio termico	36
Assemblaggio sottoscocca	Assemblaggio parti di autoveicoli sottoscocca	Posizioni ergonomiche incongrue Movimenti altamente ripetitivi	Ritmi di lavoro Attività ripetitive Attività monotona	Apparato arti superiori	Esoscheletro a supporto braccia	6 lavoratori	1 ora di prova	Misure EMG, riduzione del deltoide del 25% e sempre sotto il valore di Soglia del rischio ridotto del 100% (40%MVC e 10%ciclo).	34
Assemblaggio sottoscocca	Assemblaggio parti di autoveicoli sottoscocca	Posizioni ergonomiche incongrue Movimenti altamente ripetitivi	Ritmi di lavoro Attività ripetitive Attività monotona	Apparato arti superiori	Esoscheletro a supporto braccia	120 lavoratori	18 mesi di prova	Questionari, riduzione della percezione della fatica su collo e spalle del 15-20%, altri settori del corpo risultati invariati.	37

	Assemblaggio sottoscocca	Assemblaggio parti di autoveicoli sottoscocca	Posizioni ergonomiche incongrue Movimenti altamente ripetitivi	Ritmi di lavoro Attività ripetitive Attività monotona	Apparato arti superiori	Esoscheletro a supporto braccia	6 lavoratori	1 ora di prova	Misure EMG, riduzione del deltoide del 32%, e 25% trapezio.	38
	Assemblaggio sottoscocca	Assemblaggio parti di autoveicoli sottoscocca	Posizioni ergonomiche incongrue Movimenti altamente ripetitivi	Ritmi di lavoro Attività ripetitive Attività monotona	Apparato arti superiori	Esoscheletro a supporto braccia	16 lavoratori	12 minuti di prova	Misure EMG, riduzione del deltoide del 8%, ed aumento 3% del trapezio.	39
	Assemblaggio sottoscocca	Assemblaggio parti di autoveicoli sottoscocca	Posizioni ergonomiche incongrue Movimenti altamente ripetitivi	Ritmi di lavoro Attività ripetitive Attività monotona	Apparato arti superiori	Esoscheletro a supporto braccia	198 lavoratori	18 mesi di prova	Questionari, efficace nel ridurre le sollecitazioni fisiche sulle spalle e collo durante assemblaggio.	40
Manifattura	Macchine utensili per Metal Forming	Caricamento e/o svuotamento inizo/fine linea	Movimenti altamente ripetitivi Sollevamento carichi	Ritmi di lavoro Attività ripetitive Attività monotona	Apparato dorso-lombare e arti inferiori	Esoscheletro a supporto schiena	10 lavoratori	3 settimane	Misure EMG, riduzione 12% Erector Spinae	41

				Fatica						
	Assemblaggio in catena di montaggio	Posizionamento di pannelli ad altezza sopra i 2 metri. Peso 10-25 kg	Posizioni ergonomiche incongrue Movimenti altamente ripetitivi Sollevamento carichi	Ritmi di lavoro Attività ripetitive Attività monotona	Apparato arti superiori	Esoscheletro a supporto braccia	3 lavoratori	2 ore di prova	Misure EMG, riduzione del bicipite del 50% tricipite del 22%.	42
Nautica	Finitura sottoscafo	Carteggiatura, lucidatura e pittura dello scafo con utilizzo strumenti	Posizioni ergonomiche incongrue Movimenti altamente ripetitivi	Ritmi di lavoro Attività ripetitive Attività monotona Microclima ambientale	Apparato arti superiori	Esoscheletro a supporto braccia	9 lavoratori	1 giorno di prova	Misure di frequenza cardiache, mostrano una riduzione del 7.8% della frequenza durante task con braccia sollevate.	43
Costruzione edile	Montaggio pannelli	Posizionamento e montaggio di pannelli sopra la testa. Peso 1 kg	Posizioni ergonomiche incongrue Movimenti altamente ripetitivi	Ritmi di lavoro Attività ripetitive Attività monotona	Apparato arti superiori	Esoscheletro a supporto braccia	3 lavoratori	1 ora di prova	Misure di cinematica e mobilità, mostrano una sistematica modifica del pattern motorio.	44

	Intonacatura e finiture del laterizio	Posizionamento e montaggio di pannelli sopra la testa. Peso 1 kg	Posizioni ergonomiche incongrue Movimenti altamente ripetitivi	Ritmi di lavoro Attività ripetitive Fatica	Apparato arti superiori	Esoscheletro a supporto braccia	45 lavoratori	7 settimane di prova	Questionari, mostrano una riduzione del carico e della fatica.	45
Assistenza sanitaria	Movimentazione dei pazienti senza ausili	Movimentazione pazienti	Posizioni ergonomiche incongrue Sollevamento carichi	Ritmi di lavoro Fatica	Apparato dorso-lombare e muscolo scheletrico	Esoscheletro a supporto schiena	5 lavoratori	3 ore di prova	Questionari, mostrano una riduzione del carico e della fatica e una sufficiente usabilità per tutti i dispositivi.	46
Alimentare	Fasi manuali in catena di approvvigionamento alimentare	Movimentazione di oggetti dal peso variabile (fino a 15 kg)	Posizioni ergonomiche incongrue Movimenti altamente ripetitivi Sollevamento carichi	Ritmi di lavoro Attività ripetitive Attività monotona	Apparato dorso-lombare	Esoscheletro a supporto schiena	10 lavoratori	due ore per prova, 4 giorni di sperimentazione.	Misure EMG, riduzione degli erettori spinali del 40% durante sollevamento e 30% durante il trasporto.	47

Agricoltura	Raccolta	Movimentazione di oggetti dal peso variabile (fino a 3 kg), mantenimento di posture per raggiungere il suolo	Posizioni ergonomiche incongrue Movimenti altamente ripetitivi Sollevamento carichi	Ritmi di lavoro Attività ripetitive Fatica	Apparato dorso-lombare e arti inferiori	Esoscheletro a supporto schiena	15 lavoratori	1 ora per prova	Questionari, mostrano un miglioramento della produttività, salute e sicurezza, a patto di riscontrare un'adeguatezza con il tipo di compito	48
	Spalare grano e fieno e muovere balle di fieno	Movimentazione di oggetti dal peso variabile (fino a 25-30 kg), movimenti dinamici asimmetrici	Posizioni ergonomiche incongrue Movimenti altamente ripetitivi Sollevamento carichi	Ritmi di lavoro Attività ripetitive Fatica	Apparato dorso-lombare e arti inferiori	Esoscheletro a supporto schiena	14 lavoratori	1 ora per prova	Misure EMG, riduzione degli erettori spinali del 30% durante sollevamento e 16% durante attività di spalare.	49
	Trattamenti chimici	Spraying diserbanti in frutteti	Posizioni ergonomiche incongrue Movimenti altamente ripetitivi	Ritmi di lavoro Attività ripetitive Attività monotona Fatica	Apparato arti superiori	Esoscheletro a supporto braccia	14 lavoratori	1 ora per prova	Misure EMG, riduzione del deltoide del 20% durante attività.	50

				Microclima						
Logistica	Trasferimento merci	Presa e spostamento merci	Posizioni ergonomiche incongrue Movimenti altamente ripetitivi Sollevamento carichi	Ritmi di lavoro Attività ripetitive Attività monotona Fatica	Apparato dorso-lombare	Esoscheletro a supporto schiena	11 lavoratori	30 minuti per prova	Misure EMG, riduzione del erettori spinali del 10% durante attività di sollevamento	51
	Trasferimento merci	Presa e spostamento merci	Posizioni ergonomiche incongrue Movimenti altamente ripetitivi Sollevamento carichi	Ritmi di lavoro Attività ripetitive Attività monotona Fatica	Apparato dorso-lombare	Esoscheletro a supporto schiena	31 lavoratori	30 minuti per prova	Questionari, mostrano un risultato moderato in termini di efficacia nella riduzione del carico nella condizione necessaria che il task sia appropriato per il dispositivo e che il dispositivo sia indossato bene.	52
Servizi di pulizie	Pulizie di soffitti e vetrate alte	Movimentazione di aste	Posizioni ergonomiche	Attività ripetitive	Apparato arti superiori	Esoscheletro a	10 lavoratori	30 minuti per prova	Misure EMG, riduzione dei deltoidi anteriore e	53

		telescopiche per il lavaggio	he incongrue Movimenti altamente ripetitivi	Attività monotona Fatica		supporto braccia			mediale e trapezio superiore tra il 20 e il 30% durante attività. Questionari indicano riduzione dello sforzo percepito su braccia, spalle e schiena	
--	--	---------------------------------	---	--------------------------------	--	---------------------	--	--	---	--

BIBLIOGRAFIA

- [1] Näf, M. B., Koopman, A. S., Baltrusch, S., Rodriguez-Guerrero, C., Vanderborght, B., & Lefeber, D. (2018). Passive back support exoskeleton improves range of motion using flexible beams. *Frontiers in Robotics and AI*, 5, 72.
- [2] Schiele, A., & van der Helm, F. C. T. (2006). Kinematic design to improve ergonomics in human machine interaction. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 14(4), 456–469.
- [3] de Looze, M. P., Bosch, T., Krause, F., Stadler, K. S., & O’Sullivan, L. W. (2016). Exoskeletons for industrial application and their potential effects on physical work load. *Ergonomics*. <https://doi.org/10.1080/00140139.2015.1081988>
- [4] Grazi, L., Trigili, E., Proface, G., Giovacchini, F., Crea, S., & Vitiello, N. (2020). Design and Experimental Evaluation of a Semi-Passive Upper-Limb Exoskeleton for Workers with Motorized Tuning of Assistance. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2020.3014408>
- [5] Kim, Y. G., Little, K., Noronha, B., Xiloyannis, M., Masia, L., & Accoto, D. (2020). A voice activated bi-articular exosuit for upper limb assistance during lifting tasks. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 66, 101995.
- [6] Lamers, E. P., Yang, A. J., & Zelik, K. E. (2017). Feasibility of a biomechanically-assistive garment to reduce low back loading during leaning and lifting. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 65(8), 1674–1680.
- [7] Crea, S., Beckerle, P., De Looze, M., De Pauw, K., Grazi, L., Kermavnar, T., ... & Veneman, J. (2021). Occupational exoskeletons: A roadmap toward large-scale adoption. *Methodology and challenges of bringing exoskeletons to workplaces*. *Wearable Technologies*, 2.
- [8] Matteo Sposito, Christian Di Natali, Stefano Toxiri, Darwin G. Caldwell, Elena De Momi, and Jesús Ortiz. 2020. Exoskeleton kinematic design robustness: An assessment method to account for human variability. *Wearable Technologies* 1 (2020), 1–26. <https://doi.org/10.1017/wtc.2020.7>
- [9] Leia Stirling, Damian Kelty-Stephen, Richard Fineman, Monica L.H. Jones, Byoung Keon Daniel Park, Matthew P. Reed, Joseph Parham, and Hyeg Joo Choi. 2020. Static, Dynamic, and Cognitive Fit of Exosystems for the Human Operator. *Human Factors* 62, 3 (2020), 424–440. <https://doi.org/10.1177/0018720819896898>
- [10] Sposito, Matteo, Tommaso Poliero, Christian Di Natali, Stefano Toxiri, Sara Anastasi, Francesco Draicchio, Luigi Monica, Darwin Caldwell, Elena De Momi, and Jesus Ortiz. "Physical Comfort of Occupational Exoskeletons: Influence of Static Fit on Subjective Scores." In *The 14th PErvasive Technologies Related to Assistive Environments Conference*, pp. 60-68. 2021.
- [11] Matthias B. Näf, Karen Junius, Marco Rossini, Carlos Rodriguez-Guerrero, Bram Vanderborght, and Dirk Lefeber. 2019. Misalignment Compensation for Full Human-Exoskeleton Kinematic Compatibility: State of the Art and Evaluation. *Applied Mechanics Reviews* 70, 5 (2019), 050802. <https://doi.org/10.1115/1.4042523>
- [12] Di Natali C, Chini G, Toxiri S, Monica L, Anastasi S, Draicchio F, Caldwell DG, Ortiz J. Equivalent Weight: Connecting Exoskeleton Effectiveness with Ergonomic Risk during Manual Material Handling. *Int J Environ Res Public Health*. 2021 Mar 7; 18(5):2677. doi: 10.3390/ijerph18052677

- [13] Zelik KE, Nurse CA, Schall MC Jr, Sesek RF, Marino MC, Gallagher S. An ergonomic assessment tool for evaluating the effect of back exoskeletons on injury risk. *Appl Ergon.* 2022 Feb; 99:103619. doi: 10.1016/j.apergo.2021.103619.
- [14] Gillette, J.C., Stephenson, M.L., 2019. Electromyographic assessment of a shoulder support exoskeleton during on-site job tasks. *IISE Trans. Occup. Ergon. Hum. Factors* 7, 302–310. doi.org/10.1080/24725838.2019.1665596
- [15] Steinhilber B, Luger T, Schwenkreis P, Middeldorf S, Bork H, Mann B, von Glinski A, Schildhauer TA, Weiler S, Schmauder M, Heinrich K, Winter G, Schnalke G, Frener P, Schick R, Wischniewski S, Jäger M. The use of exoskeletons in the occupational context for primary, secondary, and tertiary prevention of work-related musculoskeletal complaints. *IISE Trans Occup Ergon Hum Factors.* 2020 Jul-Sep; 8(3):132-144. doi: 10.1080/24725838.2020.1844344.
- [16] Monica L, Draicchio F, Anastasi S. Occupational exoskeletons: wearable robotic devices to prevent work related musculoskeletal disorders in the workplace of the future. European Agency for Safety and Health at Work, 2020.
- [17] Peters, M., Wischniewski, S. The impact of using exoskeletons on occupational safety and health, European Agency for Safety and Health at Work, 2019.
- [18] Standard Guide for Hazards for Consideration when Designing Exoskeletons, ASTM F3540 – 21, 2021
- [19] Standard Guide for Assessing Risks Related to Implementation of Exoskeletons in Task-Specific Environments, ASTM F3527-21, 2021
- [20] Exosquelettes au travail: impact sur la santé et la sécurité des opérateurs état des connaissances, INRS ED 6311, 2018
- [21] Acquisition et intégration d'un exosquelette en entreprise – INRS ED 6315, 2022
- [22] Steinhilber B et al, The use of exoskeletons in the occupational context for primary, secondary and tertiary prevention of work-related musculoskeletal complaints, *IISE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*, 2020
- [23] Risk assessment for exoskeletons, IFA 2019 (https://www.dguv.de/medien/ifa/en/prae/ergonomie/en_risk-assessment-for-exoskeletons-1.1.pdf)
- [24] Spada S, Ghibaudo L, Gilotta S, Gastaldi L and Cavatorta MP (2017) Investigation into the applicability of a passive upper-limb exoskeleton in automotive industry. *Procedia Manufacturing* 11, 1255-1262. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.252>
- [25] Gillette JC and Stephenson ML (2018) EMG analysis of an upper body exoskeleton during automotive assembly. *Proceedings of the 42nd Annual Meeting of the American Society of Biomechanics*, August, pp. 308-309
- [26] Claramunt-Molet M, Domingo-Mateu B, Danús-Jaume J, Ugartemendia-Etxarri A, De La Maza I, Enriquez-Carrera V, Muñoz-Fernandez O, Domingo S, Miralles F, Font-Llagunes JM and Idelsohn-Zielonka S (2019) Biomechanical evaluation of upper limb exoskeletons in automotive assembly using EMG. In *Reunión Del Capítulo Español de La Sociedad Europea de Biomecánica*. Barcelona: Grupo de Investigación de Biomateriales y Biomecánica, pp. 25-26.

- [27] Ferreira G, Gaspar J, Fujão C and Nunes IL (2020) Piloting the use of an upper limb passive exoskeleton in automotive industry: Assessing user acceptance and intention of use BT. In Nunes IL (ed.), *Advances in Human Factors and Systems Interaction*. Cham: Springer International Publishing, pp. 342-349. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-51369-6_46
- [28] Iranzo S, Piedrabuena A, Iordanov D, Martinez-Iranzo U and Belda-Lois J-M (2020) Ergonomics assessment of passive upper-limb exoskeletons in an automotive assembly plant. *Applied Ergonomics* 87, 103120. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apergo.2020.103120>
- [29] S. Kim, A. Moore, D. Srinivasan, A. Akanmu, A. Barr, C. Harris-Adamson, D. M. Rempel, M.A. Nussbaum, Potential of exoskeleton technologies to enhance safety, health, and performance in construction: industry perspectives and future research directions, *IISE Trans. Occup. Ergon. Human Fact.* 7 (3–4) (2019) 185–191, <https://doi.org/10.1080/24725838.2018.1561557>
- [30] Zhu, Z., Dutta, A., & Dai, F. (2021). Exoskeletons for manual material handling—A review and implication for construction applications. *Automation in Construction*, 122, 103493.
- [31] Dossier tecnico sicurezza invecchiamento forza lavoro (approvato dal Consiglio Nazionale degli Ingegneri nella seduta del 14/11/2019) - https://www.cni.it/images/temi/sicurezza/Dossier_tecnico_Invecchiamento_forza_lavoro_30102_019_definitivo_GDLMI.pdf
- [32] Hensel, Ralph, and Mathias Keil. "Subjective evaluation of a passive industrial exoskeleton for lower-back support: A field study in the automotive sector." *IISE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors* 7, no. 3-4 (2019): 213-221.
- [33] Graham, R.B., Agnew, M.J., Stevenson, J.M., 2009. Effectiveness of an on-body lifting aid at reducing lowback physical demands during an automotive assembly task: assessment of emg response and user acceptability. *Appl. Ergon.* 40 (5), 936-942
- [34] Gillette, Jason C., and Mitchell L. Stephenson. "Electromyographic assessment of a shoulder support exoskeleton during on-site job tasks." *IISE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors* 7, no. 3-4 (2019): 302-310.
- [35] Iranzo S, Piedrabuena A, Iordanov D, Martinez-Iranzo U and Belda-Lois J-M (2020) Ergonomics assessment of passive upper-limb exoskeletons in an automotive assembly plant. *Applied Ergonomics* 87, 103120.
- [36] Maurice, Pauline, Jernej Čamernik, Daša Gorjan, Benjamin Schirrmeister, Jonas Bornmann, Luca Tagliapietra, Claudia Latella et al. "Objective and subjective effects of a passive exoskeleton on overhead work." *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering* 28, no. 1 (2019): 152-164. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apergo.2020.103120>.
- [37] Kim, Sunwook, Maury A. Nussbaum, Marty Smets, and Shyam Ranganathan. "Effects of an arm-support exoskeleton on perceived work intensity and musculoskeletal discomfort: An 18-month field study in automotive assembly." *American Journal of Industrial Medicine* 64, no. 11 (2021): 905-914.
- [38] Claramunt-Molet M, Domingo-Mateu B, Danús-Jaume J, Ugartemendia-Etxarri A, De La Maza I, Enriquez-Carrera V, Muñoz-Fernandez O, Domingo S, Miralles F, Font-Llagunes JM and Idelsohn-Zielonka S (2019) Biomechanical evaluation of upper limb exoskeletons in automotive assembly

- using EMG. In Reunión Del Capítulo Español de La Sociedad Europea de Biomecánica. Barcelona: Grupo de Investigación de Biomateriales y Biomecánica, pp. 25–26.
- [39] Gillette, Jason C., and Mitchell L. Stephenson. "EMG analysis of an upper body exoskeleton during automotive assembly." In Proceedings of the American Society of Biomechanics Annual Meeting, Rochester, MN. 2018.
- [40] Kim, Sunwook, Maury A. Nussbaum, and Marty Smets. "Usability, user acceptance, and health outcomes of arm-support exoskeleton use in automotive assembly: an 18-month field study." *Journal of Occupational and Environmental Medicine* 64, no. 3 (2022): 202-211.
- [41] Amandels, Steven, Hans Op het Eyndt, Liesbeth Daenen, and Veerle Hermans. "Introduction and testing of a passive exoskeleton in an industrial working environment." In Proceedings of the 20th Congress of the International Ergonomics Association (IEA 2018) Volume III: Musculoskeletal Disorders 20, pp. 387-392. Springer International Publishing, 2019.
- [42] Pacifico, Ilaria, et al. "Evaluation of a spring-loaded upper-limb exoskeleton in cleaning activities." *Applied Ergonomics* 106 (2023): 103877.
- [43] Moyon, Aurélie, Emilie Poirson, and Jean-François Petiot. "Experimental study of the physical impact of a passive exoskeleton on manual sanding operations." *Procedia Cirp* 70 (2018): 284-289.
- [44] Bennett, Sean T., Peter G. Adamczyk, Fei Dai, Dharmaraj Veeramani, and Michael Wehner Senior. "Upper extremity exoskeletons in construction, a field-based study."
- [45] de Vries, A. W., S. J. Baltrusch, and M. P. de Looze. "Field study on the use and acceptance of an arm support exoskeleton in plastering." *Ergonomics* just-accepted (2022): 1-12.
- [46] Settembre, Nicla, Pauline Maurice, Jean Paysant, Jean Theurel, Laurent Claudon, Antoine Kimmoun, Bruno Levy, Hind Hani, Bruno Chenuel, and Serena Ivaldi. "The use of exoskeletons to help with prone positioning in the intensive care unit during COVID-19." *Annals of physical and rehabilitation medicine* 63, no. 4 (2020): 379-382.
- [47] Poliero, Tommaso, Matteo Sposito, Stefano Toxiri, Christian Di Natali, Matteo Iurato, Vittorio Sanguineti, Darwin G. Caldwell, and Jesús Ortiz. "Versatile and non-versatile occupational back-support exoskeletons: A comparison in laboratory and field studies." *Wearable Technologies* 2 (2021): e12.
- [48] Omoniyi, Abisola, Catherine Trask, Stephan Milosavljevic, and Ornwipa Thamsuwan. "Farmers' perceptions of exoskeleton use on farms: Finding the right tool for the work (er)." *International Journal of Industrial Ergonomics* 80 (2020): 103036.
- [49] Thamsuwan, Ornwipa, Stephan Milosavljevic, Divya Srinivasan, and Catherine Trask. "Potential exoskeleton uses for reducing low back muscular activity during farm tasks." *American Journal of Industrial Medicine* 63, no. 11 (2020): 1017-1028.
- [50] Wang, Hsien-Min, Dang Khanh Linh Le, and Wei-Chih Lin. "Evaluation of a passive upper-limb exoskeleton applied to assist farming activities in fruit orchards." *Applied Sciences* 11, no. 2 (2021): 757.
- [51] Yandell, Matthew B., Anna E. Wolfe, Matthew C. Marino, Mark P. Harris, and Karl E. Zelik. "Effect of a Back-Assist Exosuit on Logistics Worker Perceptions, Acceptance, and Muscle Activity." In *Wearable Robotics: Challenges and Trends: Proceedings of the 5th International Symposium on Wearable Robotics, WeRob2020, and of WearRAcon Europe 2020, October 13–16, 2020*, pp. 7-11. Springer International Publishing, 2022.

- [52] Siedl, Sandra M., and Martina Mara. "Exoskeleton acceptance and its relationship to self-efficacy enhancement, perceived usefulness, and physical relief: A field study among logistics workers." *Wearable Technologies* 2 (2021): e10.
- [53] Smets, Marty. "A field evaluation of arm-support exoskeletons for overhead work applications in automotive assembly." *IIE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors* 7, no. 3-4 (2019): 192-198.

Copyright

Riproduzione vietata. Tutti i diritti sono riservati. Nessuna parte del presente documento può essere riprodotta o diffusa con un mezzo qualsiasi, fotocopie, microfilm o altro, senza il consenso scritto dell'UNI.