



EVOSKELETRO

Casi studio



Gentile Professionista,

Abbiamo raccolto per Lei una selezione di casi studio che esplorano in dettaglio l'utilizzo degli esoscheletri in contesti industriali. Questa guida intende fornire un supporto pratico e concreto, approfondendo i benefici ergonomici, le soluzioni innovative e le sfide che possono emergere nell'adozione di queste tecnologie.

Gli esempi riportati evidenziano come gli esoscheletri possano contribuire a migliorare la sicurezza sul lavoro, ridurre l'affaticamento fisico e incrementare la produttività, ponendo al centro il benessere dell'operatore. Di seguito, troverà due studi approfonditi che rappresentano casi significativi di applicazione:

- 1. Effetti di un esoscheletro di supporto per il braccio sull'intensità di lavoro percepita e sul disagio muscoloscheletrico.***
- 2. Usabilità, accettazione da parte dell'utente e risultati sulla salute dell'uso dell'esoscheletro di supporto del braccio nell'assemblaggio automobilistico.***

La invitiamo a esplorare i dati e le esperienze contenuti nei documenti seguenti, certi che troverà spunti utili e ispirazione per affrontare con successo le sfide del Suo settore.

*Con stima,
Il Team di Evomach*

Effetti di un esoscheletro di supporto per il braccio sull'intensità di lavoro percepita e sul disagio muscoloscheletrico: uno studio sul campo di 18 mesi nell'assemblaggio automobilistico

Sunwook Kim¹  | Maury A. Nussbaum¹  | Marty Smets²  |
Shyam Ranganathan³ 

¹Department of Industrial & Systems Engineering, Virginia Tech, Blacksburg, Virginia, USA

²Manufacturing Technology Development, Ford Motor Company, Glendale, Michigan, USA

³Department of Statistics, Virginia Tech Blacksburg, Blacksburg, Virginia, USA

Correspondence

Maury A. Nussbaum, Department of Industrial and Systems Engineering, Virginia Tech, 250 Durham Hall (0118), Blacksburg, VA 24061, USA.
Email: nussbaum@vt.edu

Funding information

Ford Motor Company

SOMMARIO:

Background: le tecnologie dell'esoscheletro (EXO) rappresentano un promettente intervento ergonomico per ridurre il rischio di disturbi muscoloscheletrici legati al lavoro, con efficacia supportata da studi di laboratorio e sul campo. Tuttavia, mancano prove sul campo sugli effetti a lungo termine dell'uso di EXO sulle esigenze fisiche.

Metodi: è stato utilizzato un disegno di ricerca longitudinale e controllato per esaminare gli effetti dell'uso dell'esoscheletro di supporto del braccio (ASE) sulle richieste fisiche percepite durante il lavoro sopra la testa in nove stabilimenti di produzione automobilistica. I dati sono stati raccolti in cinque tappe fondamentali (baseline e a 1, 6, 12 e 18 mesi) utilizzando questionari. Sono stati utilizzati modelli misti lineari per comprendere gli effetti dell'uso dell'ASE sull'intensità del lavoro percepito e sul disagio muscoloscheletrico (DMS). Le analisi si basavano su un totale di 41 partecipanti nel gruppo EXO e 83 in un gruppo di controllo.

Risultati: nelle strutture, l'intensità di lavoro percepita e i punteggi MSD non differivano significativamente tra i gruppi EXO e di controllo. In alcune strutture, tuttavia, i punteggi relativi ai DMS del collo e delle spalle nel gruppo EXO sono diminuiti nel tempo. I punteggi dei DMS del polso nel gruppo EXO in alcune strutture sono rimasti invariati, mentre nel gruppo di controllo tali punteggi sono aumentati nel tempo. I punteggi MSD della parte superiore del braccio e della parte bassa della schiena erano comparabili tra i gruppi sperimentali.

Conclusione: non sono stati riscontrati effetti longitudinali dell'uso dell'ASE sulle richieste fisiche percepite, sebbene fossero evidenti alcuni risultati suggestivi. Viene discussa questa mancanza di risultati coerenti, in particolare a sostegno della necessità di approcci di implementazione ASE sistematici e basati sull'evidenza sul campo che possano guidare la selezione ottimale di un lavoro per l'utilizzo ASE.

1 | INTRODUZIONE

Le tecnologie dell'esoscheletro (EXO) hanno guadagnato crescente attenzione per le applicazioni professionali come un modo per aumentare la capacità di un utente di completare attività manuali in diversi ambienti di lavoro. Aumentando la capacità fisica, l'utilizzo di un EXO può ridurre i requisiti fisici di un'attività in modo che l'utente possa sperimentare un minor rischio di lesioni e ottenere prestazioni migliori. Numerosi studi di laboratorio controllati hanno fornito prove coerenti del fatto che l'uso di un EXO può ridurre i livelli di attività muscolare, lo sforzo percepito e i costi metabolici.¹⁻⁸ In alcuni casi, l'uso di EXO può migliorare le prestazioni del compito, probabilmente a causa di una riduzione dell'affaticamento muscolare o maggiore stabilità dei movimenti del corpo.^{9,10} L'entità di tali effetti benefici, tuttavia, dipende chiaramente dalle condizioni specifiche del compito (ad esempio, piegamento simmetrico o asimmetrico del tronco, sollevamento o trasporto) e dalle differenze individuali come il genere.^{4,11,12} I lavori esistenti evidenziano anche effetti potenzialmente indesiderabili dell'utilizzo di un EXO, tra cui elevata pressione di contatto,¹³⁻¹⁵ gamma limitata di movimenti articolari,¹⁶⁻¹⁸ e posture di lavoro alterate come l'estensione del ginocchio.¹⁵ Nel complesso, l'accumulo di prove di laboratorio supporta l'uso di EXO come una chiara efficacia come intervento per controllare i rischi di disturbi muscoloscheletrici legati al lavoro, ma evidenzia anche la necessità di ottimizzare la corrispondenza tra un EXO, un compito e un utente per massimizzare i benefici, effetti e minimizzare i risultati indesiderati.

Per supportare l'adozione e l'uso sicuro degli EXO nella pratica, tuttavia, le prove sul campo sono fondamentali per comprendere l'effettiva efficacia, praticità, sicurezza e accettazione da parte degli utenti.^{19,20} Sono stati riportati alcuni lavori dai test sul campo degli EXO, che vanno da meno di un'ora fino a un periodo di 3 mesi, nell'assemblaggio automobilistico,^{9,21-24} nella produzione,²⁵ nel magazzinaggio,^{26,27} e in ambienti agricoli.^{28,29} Gli esoscheletri di supporto del braccio (ASE) erano tipicamente utilizzati sul campo - testati per lavori che comportano assemblaggio e sollevamento dall'alto, mentre gli esoscheletri di supporto per la schiena (BSE) sono stati testati per lavori che comportano il sollevamento manuale di materiali, lo spalamento o che richiedono una flessione prolungata del tronco. I risultati di questi studi concordano generalmente con le prove di laboratorio, in quanto l'uso di un EXO può ridurre le richieste fisiche.

Le misure soggettive erano in genere i risultati primari negli studi sul campo noti, sebbene alcuni abbiano valutato l'attività muscolare in due o quattro gruppi muscolari e/o la frequenza cardiaca mentre i lavoratori utilizzavano un EXO.^{23,25-27,29} Specifico per gli ASE, il loro utilizzo ha portato a riduzioni del 10%-26% circa nella spalla (deltoide anteriore, bicipite brachiale e trapezio) e nei gruppi muscolari della parte bassa della schiena (erettore lombare della colonna vertebrale) durante le attività di assemblaggio automobilistico e di sollevamento sopra la testa.

L'uso dell'ASE ha anche ridotto la frequenza cardiaca media, con De Bock et al.²⁷ che hanno riportato una riduzione fino al 19% durante il lavoro sopra la testa in una struttura di distribuzione e Marino³⁰ che ha riscontrato una diminuzione del 3,4% durante le attività di stoccaggio in un negozio al dettaglio. Lo studio precedente, tuttavia, ha dimostrato che l'entità degli effetti benefici di un ASE può essere sostanzialmente inferiore sul campo (prelievo degli ordini da uno scaffale alto), rispetto a un ambiente controllato di laboratorio. Nel complesso, queste prove sul campo relative agli ASE suggeriscono che i risultati ottenuti dalle simulazioni di attività di laboratorio possono essere generalizzabili sul campo, sebbene l'entità degli effetti benefici possa essere inferiore.

Gli studi sul campo sull'uso degli EXO forniscono anche informazioni più ricche su aspetti importanti dell'uso degli EXO, tra cui praticità, sicurezza e accettazione da parte dell'utente. Ad esempio, studi di laboratorio hanno evidenziato preoccupazioni circa la vestibilità, il comfort e l'usabilità di un EXO, e successivi studi sul campo hanno dimostrato che tali aspetti sono in realtà fattori chiave per l'accettazione da parte degli utenti. Quest'ultima è analoga all'adozione di tecnologie di sensori indossabili, in quanto l'accettazione sembra essere fortemente influenzata da fattori tra cui comfort e usabilità.^{31,32} Gli utenti potrebbero anche aver bisogno di tempo sufficiente per stabilire le loro percezioni sulla vera usabilità. Ad esempio, Hensel²² ha riportato una sostanziale diminuzione nell'utilizzabilità percepita di un BSE tra l'inizio e la fine di una valutazione di 4 settimane tra i lavoratori dell'assemblaggio di automobili. Il lavoro sul campo ha anche evidenziato che i benefici dell'EXO possono essere specifici al compito. Le BSE, in particolare, potrebbero essere meno efficaci per compiti dinamici e/o che implicano diverse posture lavorative, dato che sono state riscontrate riduzioni relativamente minori delle richieste fisiche e un maggiore disagio rispetto a compiti più statici o con variabilità limitata.^{22,25} Negli studi sul campo sono stati individuati anche problemi di sicurezza, tra cui salire e scendere da un transpallet,²⁶ utilizzare un EXO in spazi ristretti,²³ difficoltà nel percepire i carichi immediatamente dopo aver tolto l'EXO,²⁶ rimanere intrappolati in bordi taglienti e lavorare vicino o con fonti elettriche.²⁸

Tuttavia, è ancora essenziale indagare gli effetti a lungo termine dell'uso di EXO, poiché potrebbe esserci un lungo periodo di latenza affinché gli effetti dell'uso di EXO siano evidenti sulla salute dei lavoratori (ad esempio, sviluppo o cambiamento della gravità di un lavoro disturbi muscoloscheletrici correlati). Nel presente lavoro, abbiamo mirato a rispondere a questa esigenza utilizzando uno studio prospettico e controllato sul campo degli effetti dell'utilizzo di un ASE tra i lavoratori in diversi impianti di assemblaggio automobilistico per un periodo di 18 mesi. Gli effetti dell'uso dell'ASE sono stati determinati sulla base delle risposte soggettive

relative al disagio muscoloscheletrico e all'intensità del lavoro. Data la scarsità di studi sul campo a lungo termine sugli EXO, abbiamo anche cercato di condividere le lezioni apprese durante il corso

dello studio, per supportare futuri studi di ricerca. segnaletica e implementazioni sul campo delle tecnologie EXO.

2 | METODI

2.1 | Design sperimentale

Questo studio è frutto di una collaborazione tra ricercatori accademici e specialisti di ingegneria ed ergonomia presso Ford Motor Company. Abbiamo utilizzato un disegno di ricerca longitudinale e controllato. I lavoratori sono stati reclutati dai processi di assemblaggio finale presso nove stabilimenti di produzione automobilistica nel Nord America e hanno partecipato volontariamente tra aprile 2018 e dicembre 2019. I dati sono stati raccolti tramite questionari, descritti di seguito, nel corso di 18 mesi: il giorno in cui la partecipazione è iniziata senza l'uso di EXO (baseline), e di nuovo a 1, 6, 12 e 18 mesi dopo la baseline (cioè M1, M6, M12 e M18).

FIGURA 1 Esempio di un operatore di assemblaggio che esegue un'attività mentre utilizza EksoVest™³³

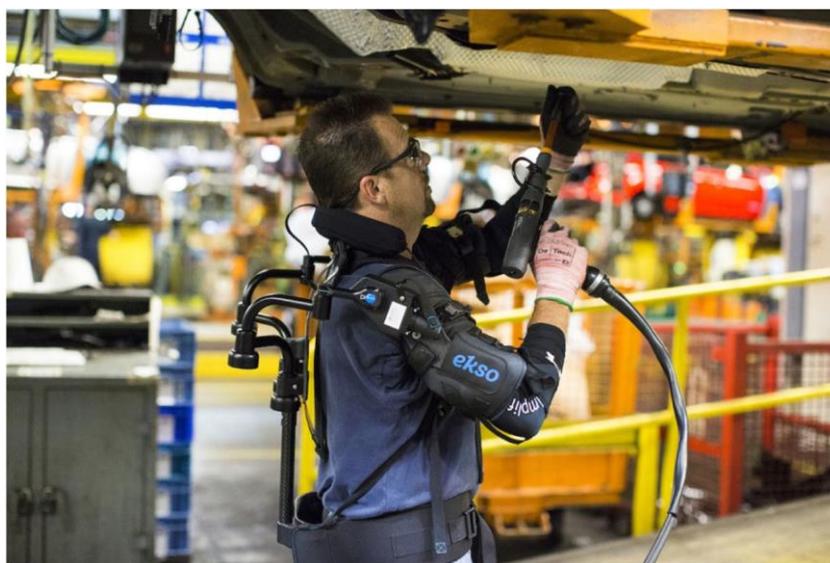


TABELLA 1

Riepilogo delle informazioni demografiche e della domanda di lavoro per ciascun gruppo sperimentale (EXO e controllo) e impianto di produzione

Facility	EXO Group					Control Group				
	<i>n</i>	Age (years)	Body mass (kg)	Stature (m)	Job demand	<i>n</i>	Age (years)	Body mass (kg)	Stature (m)	Job demand
S1	10	40 (9)	93.0 (14.1)	1.76 (0.03)	22.8 (0.2; 5)	14	39 (10)	97.5 (27.9)	1.80 (0.10)	16.4 (11.0; 8)
S2	5	38 (13)	83.9 (10.0)	1.78 (0.07)	20.7 (7.0; 5)	12	45.5 (17.2)	89.6 (6.0)	1.76 (0.12)	17.6 (2.7; 4)
S3	5	25 (5)	74.4 (25.4)	1.78 (0.08)	23.8 (6.2; 3)	8	27 (6)	78.2 (9.7)	1.79 (0.09)	29.2 (2.0; 5)
M1	5	43 (6)	83.0 (22.6)	1.78 (0.10)	23.7 (3.4; 4)	10	44 (6.5)	89.6 (26.5)	1.72 (0.11)	23.1 (1.8; 8)
L1	5	31 (3)	77.1 (18.6)	1.78 (0.05)	20.8 (9.0; 5)	12	37 (6.3)	82.8 (13.3)	1.75 (0.08)	20.9 (10.3; 12)
L2	7	30 (16.5)	80.6 (19.3)	1.70 (0.14)	21.4 (9.5; 3)	12	31 (7.5)	88.5 (22.7)	1.78 (0.09)	24.7 (11.7; 8)
L3	4	46.5 (0.5)	84.0 (14.1)	1.74 (0.05)	-	15	44 (11.5)	71.4 (22.8)	1.70 (0.12)	22.8 (5.4; 9)
Overall	41	38 (15)	83.9 (21.6)	1.78 (0.1)	22.8 (7.0)	83	38 (15)	86.2 (23.5)	1.75 (0.10)	17 (8.6)

Note: S, M, and L indicate facilities that manufactured small-, medium-, and large-sized vehicles, respectively. Cell entries for age, body mass, and stature are medians (interquartile range: Q3-Q1); cell entries for job demand are medians (interquartile range; number of participants video-recorded), Abbreviazione: EXO, exoskeleton.

Il carattere in grassetto indica una differenza significativa ($p < 0,05$) tra l'EXO e il gruppo di controllo basato sul test Kruskal-Wallis.

L'ASE utilizzato era l'EksoVest™ (Ekso Bionics, Inc.; massa unitaria = 4,3 kg). Questo ASE (Figura 1) includeva un cuscino per il collo a forma di U e imbottiture per lo schienale, oltre alla possibilità di regolare la lunghezza del tronco, la lunghezza della cintura in vita e le dimensioni del polsino. Smets24 ha completato una valutazione multifase iniziale delle versioni precedenti di questo ambiente del servizio app in uno stabilimento di produzione automobilistica. Il feedback positivo degli utenti ha supportato l'attuale indagine su larga scala e a lungo termine.

2.3 | Partecipanti

Tutti i partecipanti erano operatori di assemblaggio finale che lavoravano quotidianamente su una linea aerea sulla quale il veicolo passava sopra gli operatori

mentre eseguivano lavori di montaggio dal basso; meno dell'8% delle postazioni di lavoro in genere richiede lavoro in testa presso Venti quattro partecipanti (36,9%) nel gruppo EXO e 50 (37,6%) nel gruppo di controllo si sono ritirati dallo studio, principalmente a causa di un trasferimento di lavoro a lavori non generali o per perdita di interesse. Inoltre, due impianti di produzione sono stati sottoposti a importanti modifiche, durante le quali la produzione dei veicoli si è temporaneamente interrotta e non sono stati ottenuti dati dopo le prime tappe fondamentali. I dati provenienti da queste strutture sono stati esclusi da ulteriori analisi. Pertanto, le analisi si basavano su un totale di 41 partecipanti nel gruppo EXO (30 maschi, 3 femmine e 8 non segnalati) e 83 nel gruppo di controllo (47 maschi, 14 femmine e 22 non segnalati). Le informazioni demografiche e la domanda di lavoro sono riepilogate nella Tabella 1 per ciascuna struttura. Si noti che le registrazioni video non sono state ottenute per 40 partecipanti (16 nel gruppo EXO e 24 nel gruppo di controllo); i partecipanti hanno rifiutato di essere registrati o non erano presenti durante le registrazioni. Pertanto, i punteggi della domanda fisica non erano disponibili per questi partecipanti.

Questo studio è stato esaminato e approvato dal Comitato congiunto nazionale per la salute e la sicurezza della Ford Motor Company e dall'Institutional Review Board della Virginia Tech. I partecipanti sono stati informati che la partecipazione allo studio era volontaria e che potevano ritirarsi dallo studio in qualsiasi momento senza conseguenze negative. Tutti i dati raccolti erano anonimi e riservati e venivano utilizzati solo per la ricerca accademica.

2.4 | Procedura

una struttura. Inizialmente i lavori sono stati esaminati per l'inclusione nello studio da un team di governance composto da specialisti in ingegneria ed ergonomia, per garantire che non vi fossero altri rischi aggiuntivi introdotti con l'uso di EXO (ad esempio, potenziale di intoppi sulle apparecchiature, spazio ristretto). I partecipanti sono stati quindi reclutati su base volontaria dopo essere stati contattati dal loro specialista in ergonomia. I partecipanti sono stati reclutati in un rapporto 1:2 in un gruppo EXO ($n = 65$) e un gruppo di controllo ($n = 133$). Per quanto possibile, si è cercato di garantire che entrambi i gruppi svolgessero un lavoro comparabile o fossero posizionati sulle stesse postazioni di lavoro. Abbiamo fornito ai partecipanti sia ai gruppi EXO che a quelli di controllo un altoparlante Bluetooth (valore approssimativo = \$ 15) come regalo per la loro partecipazione volontaria. Ai partecipanti al gruppo EXO era inoltre consentito conservare l'ASE, se lo desideravano, dopo la fine del periodo di studio.

Gli specialisti di ingegneria ed ergonomia sono stati formati sul dimensionamento e sul montaggio dell'EXO dal produttore dell'EXO. Un ingegnere della Ford e un rappresentante della Ekso Bionics Inc. si sono recati in ciascuna struttura partecipante per garantire una vestibilità personalizzata e per formare ciascun partecipante su come indossare, togliere e utilizzare EXO, nonché per formare gli specialisti di ergonomia locali. Gli specialisti locali di ergonomia hanno garantito il corretto adattamento dell'EXO durante lo studio, sostituendo le parti danneggiate (ad esempio, cinturini) e rimontando l'EXO secondo necessità.

I dati sono stati raccolti tramite questionari da specialisti di ergonomia locali in corrispondenza dei cinque traguardi (ovvero Baseline, M1, M6, M12 e M18). Se i partecipanti non erano disponibili il giorno della raccolta dei dati, veniva tentata la raccolta dei dati di follow-up. I dati raccolti includevano informazioni demografiche e antropometriche auto-riferite (sesso, età, massa corporea e statura), risposte relative al disagio muscoloscheletrico e risposte relative all'intensità di lavoro percepita. L'intensità del lavoro è un costrutto che si ritiene influenzi il rischio di sviluppare un disturbo muscoloscheletrico correlato al lavoro (WMSD).^{34,35} L'intensità del lavoro è stata misurata qui utilizzando due affermazioni adottate dal questionario sulle misure del clima psicologico e dello sforzo con convalida incrociata: Q1. "Quando lavoro, mi impegno davvero al massimo" e Q2. "Mi sento esausto alla fine del turno". Agli intervistati è stato chiesto di rispondere a ciascuna affermazione su una scala da 0 (fortemente in disaccordo) a 10 (fortemente d'accordo).

Il Cornell Musculoskeletal Discomfort Questionnaire (CMDQ) è stato utilizzato per catturare il disagio auto-riferito,³⁷ poiché le risposte ai questionari sui sintomi possono essere un indicatore principale dello sviluppo di WMSD.³⁸ Lavori precedenti hanno riportato che il

CMDQ ha buoni risultati.

affidabilità e validità test-retest, sebbene esaminato in versioni non inglesi.^{39,40} Il CMDQ è un questionario di 54 voci contenente un diagramma della mappa corporea e domande su dolori muscoloscheletrici, dolore o disagio in 20 regioni del corpo durante la settimana precedente. Agli intervistati viene chiesto di indicare la frequenza e la gravità del disagio e la misura in cui il disagio interferisce con il loro lavoro. Successivamente, alle risposte vengono assegnati punteggi numerici e il prodotto di questi punteggi produce un singolo punteggio MSD per ciascuna regione del corpo.⁴¹ Le nostre analisi si sono concentrate sul collo, sulle estremità superiori e sulla parte bassa della schiena, sulla base del lavoro esistente sugli effetti dell'uso dell'ASE.

Abbiamo stimato le richieste fisiche sugli arti superiori per ciascuno dei partecipanti. Previo consenso dei partecipanti, gli specialisti in ergonomia hanno effettuato registrazioni video di diversi cicli lavorativi e questi video sono stati utilizzati come base per stimare le richieste fisiche utilizzando il metodo dell'azione ripetitiva occupazionale (OCRA).⁴² Punteggi per due fattori OCRA (il fattore di postura basato su la percentuale di tempo esposto e il fattore di forza) sono stati ottenuti, sulla base delle registrazioni video e delle informazioni sulle masse degli strumenti e delle parti. Un unico punteggio relativo alla domanda fisica è stato prodotto sommando questi due punteggi. Si noti che poiché qui è stato utilizzato solo un sottoinsieme dei fattori OCRA, i punteggi riportati di seguito non dovrebbero essere considerati come rappresentativi dell'entità effettiva delle richieste fisiche, ma piuttosto solo per confronti relativi.

2.5 | Analisi Statistica

Tutte le analisi statistiche sono state condotte nel software R.⁴³ Le statistiche descrittive (medie e deviazioni standard) per tutte le misure sono state calcolate in ciascuna delle cinque tappe fondamentali della raccolta dati rispetto ai gruppi sperimentali e agli impianti di produzione. Le misure di risultato di interesse erano i punteggi MSD (collo, spalla, parte superiore del braccio, avambraccio, polso e parte bassa della schiena) e le risposte alle due domande sull'intensità del lavoro. Per le parti del corpo bilaterali, è stato incluso nell'analisi il lato con il punteggio MSD

più alto.

Per valutare se esistessero differenze tra le strutture e tra i gruppi sperimentali all'inizio dello studio, sono stati innanzitutto adattati modelli lineari per ciascuna delle misure di risultato al basale, utilizzando la funzione `lm`.⁴³ Nello specifico, abbiamo esaminato gli effetti della struttura come effetto fisso per un dato gruppo sperimentale e gli effetti dell'uso di EXO come effetto fisso per una data struttura, aggiustando per età (anni), massa corporea (kg), statura (m) e richieste fisiche stimate. Prima delle analisi qui e sotto, i punteggi MSD sono stati trasformati in log per soddisfare le ipotesi del modello parametrico e la struttura S1 è stata selezionata arbitrariamente come livello di riferimento per i modelli. Per chiarezza, i risultati riepilogativi sono riportati nelle unità originali dopo la trasformazione all'indietro.

Per valutare i cambiamenti nelle misure di risultato nel tempo, misto lineare i modelli sono stati quindi adattati, utilizzando la funzione `lmer`,⁴⁴ durante l'adeguamento valori basali, età, massa corporea, statura e domanda fisica stimata. L'analisi esplorativa iniziale non ha indicato chiare relazioni lineari tra le misure dei risultati e le tappe fondamentali (ad esempio, il tempo), né alcune chiare correlazioni temporali tra le tappe fondamentali. Inoltre, un esame degli adattamenti del modello a effetti misti non ha portato a risultati statisticamente significativi quando il tempo è stato impostato come variabile continua. Mentre è chiaro che potrebbe essere necessario modellare gli effetti temporali in modo più complesso modelli nei lavori futuri, in questo studio esplorativo, abbiamo considerato il Tempo come variabile categoriale con cinque livelli per evitare di assumere lineari cambiamenti temporali. Abbiamo incluso l'interazione del primo e del secondo ordine termini di utilizzo di EXO, con Facility e Time come effetti fissi, per esaminare se gli effetti dell'uso degli EXO dipendevano dalla struttura e dal tempo. Partecipanti nello stesso stabilimento produttivo avrebbero potuto esporre non indipendenza nelle misure di risultato. Per valutare questo, un randomil termine di intercetta per la struttura è stato esaminato in aggiunta a un'intercetta casuale termine per il Partecipante. Includere il primo non ha migliorato il modello si adatta e quindi non è stato incluso nei modelli finali. Nel Dopo i risultati, vengono presentati i valori di base per aiutare a visualizzare il risultati nel tempo; questi valori sono stati estratti da un modello che lo ha fatto non includere i valori di base come covariata. La significatività statistica era determinata a $p < 0,1$ data la natura esplorativa dello studio.

2.5.1 | Dati mancanti

A causa del ritiro e dell'indisponibilità dei partecipanti, mancavano complessivamente circa il 40% dei dati. La Figura 2 mostra il numero di punti dati mancanti nel tempo in ciascuno degli impianti di produzione. Per affrontare questa elevata prevalenza di dati mancanti, abbiamo utilizzato l'imputazione multivariata utilizzando equazioni concatenate (MICE). MICE produce stime asintoticamente imparziali quando i dati mancano in modo casuale o mancano completamente in modo casuale⁴⁵, sebbene le stime possano essere distorte quando i dati mancano in modo non casuale.⁴⁶ Le imputazioni multiple comportano, ad ogni imputazione, la sostituzione dei valori mancanti con valori imputati estratti da la loro distribuzione prevista in dati non mancanti. Abbiamo eseguito imputazioni multiple per imputare i valori mancanti (punteggi MSD e risposte alle domande sull'intensità del lavoro) utilizzando il pacchetto topi,⁴⁷ includendo tutte le variabili nei modelli misti (ad esempio, struttura, tempo, uso di EXO, età, massa corporea, statura e esigenze fisiche). Abbiamo generato 200 set di dati completi, dato che la potenza statistica e la precisione delle stime possono essere migliorate con un numero maggiore di imputazioni (m). Si noti che Graham et al.⁴⁸ hanno suggerito $m = 40$ per il 50% dei dati mancanti e Twisk et al.⁴⁹ hanno notato che i risultati del modello misto può essere instabile anche con 100 imputazioni. Abbiamo quindi adattato modelli lineari e misti separati su ciascun set di dati imputati e combinato i coefficienti stimati e gli errori standard utilizzando le regole di Rubin.⁴⁷

3 | RISULTATO

3.1 | Caratteristiche di base

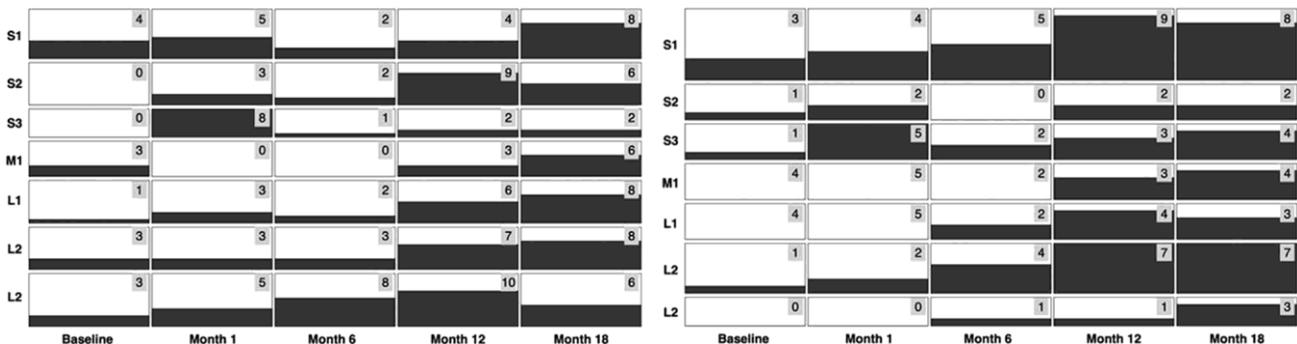


FIGURA 2 | Illustrazione dei dati mancanti in ciascuno degli impianti di produzione per il gruppo di controllo (a sinistra) e il gruppo EXO (a destra), in ciascuna delle tappe fondamentali della raccolta dati. I rettangoli mostrano le proporzioni dei dati mancanti (grigio scuro) e non mancanti (bianco), mentre i numeri nelle caselle ombreggiate rappresentano il numero di valori mancanti

I punteggi MSD di base e le risposte alle domande sull'intensità del lavoro (WI), sia grezze che imputate, sono riepilogati nella Tabella S1 nell'Appendice delle informazioni di supporto. Per un dato gruppo sperimentale, i coefficienti dei modelli lineari indicano che questi punteggi e risposte erano generalmente paragonabili al riferimento (struttura S1), sebbene vi fossero diverse eccezioni. Nel gruppo di controllo, la struttura S3 presentava punteggi MSD significativamente più alti per collo, parte superiore del braccio, avambraccio e parte bassa della schiena; e la struttura L3 ha avuto risposte più elevate alla prima domanda WI. Nel gruppo EXO, la struttura S3 ha avuto punteggi MSD dell'avambraccio significativamente più alti e le strutture S2, L1 e L2 hanno avuto risposte significativamente più elevate a una o entrambe le domande WI. Per una data struttura, tuttavia, non vi era alcuna differenza significativa tra il gruppo di controllo e quello EXO, tranne per il fatto che il gruppo EXO nella struttura L1 aveva risposte relativamente inferiori alla prima domanda WI.

3.2 | Effetti dell'uso di EXO sull'intensità di lavoro percepita nel tempo

Un riepilogo dei risultati del modello misto è presentato nella Tabella S2 nell'Appendice delle informazioni di supporto e le risposte longitudinali alle domande sono mostrate nella Figura 3. Nelle strutture, le risposte ad entrambe le domande sull'intensità del lavoro non differivano significativamente tra i gruppi EXO e di controllo. Le risposte alla domanda Q1 sono state significativamente influenzate solo dal rispettivo valore basale ($\beta = 0,47$, $SE = 0,07$, $p < 0,0001$). Le risposte alla domanda Q2 sono state significativamente influenzate dal rispettivo valore basale ($\beta = 0,65$, $SE = 0,07$, $p < 0,0001$) e dalla statura ($\beta = -3,58$, $SE = 2,01$, $p = 0,076$).

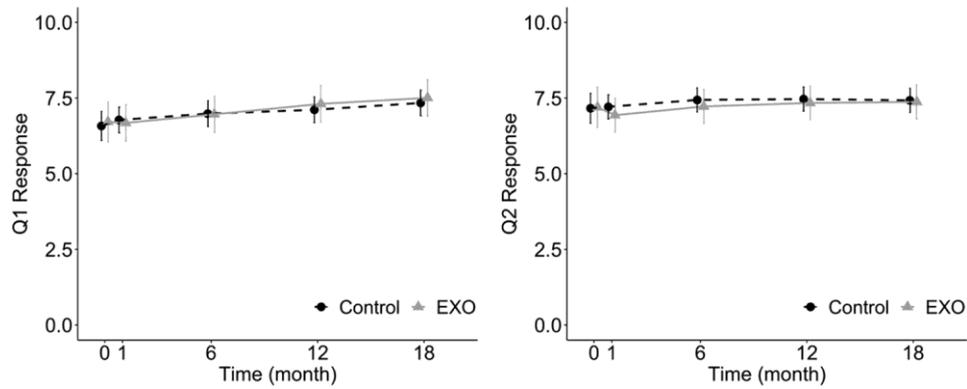


FIGURA 3 Risposte longitudinali alla domanda sull'intensità del lavoro Q1 ("Quando lavoro, mi sforzo davvero al massimo") e Q2 ("Mi sento esausto alla fine del turno") in ciascun gruppo sperimentale. I punti nei grafici sono valori mediani stimati da un mix utilizzando il set di dati imputati e le barre di errore sono intervalli di confidenza al 95%. Si noti che le risposte sono state ottenute su una scala da 0 (fortemente in disaccordo) a 10 (fortemente d'accordo)

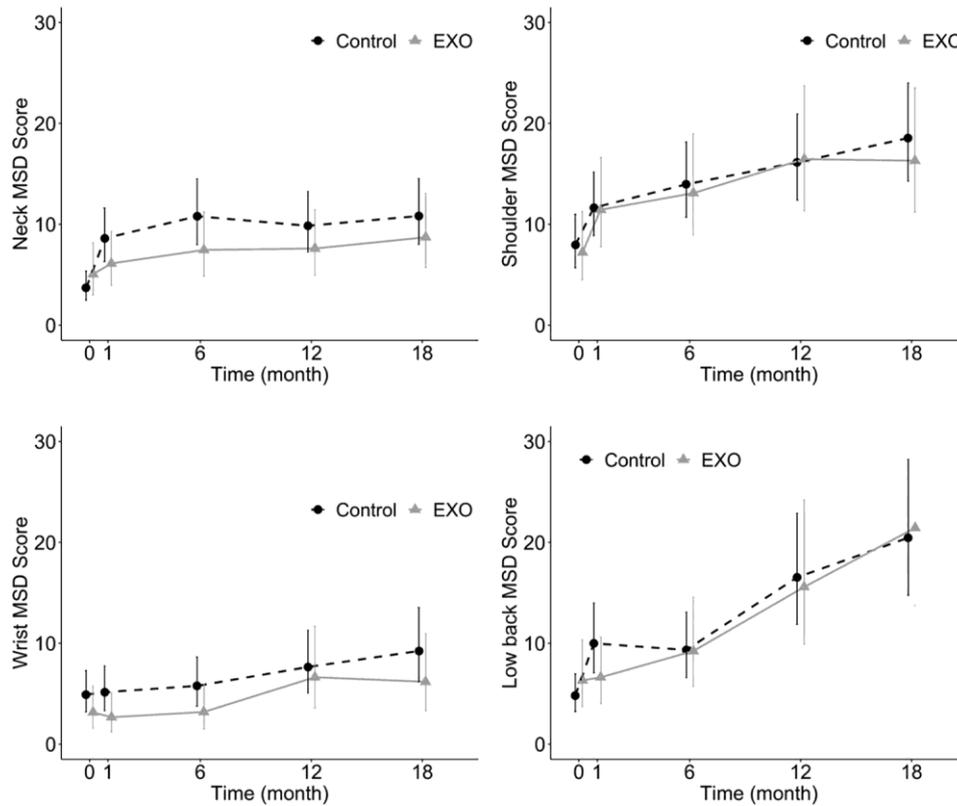


FIGURA 4 Punteggi MSD longitudinali del collo, della spalla, del polso e della parte bassa della schiena in ciascun gruppo sperimentale. I punti nella figura sono valori mediani stimati da modelli misti utilizzando il set di dati imputati e le barre di errore sono intervalli di confidenza al 95%. EXO, esoscheletro; DMS, disagio muscoloscheletrico

3.3 Effetti dell'uso di EXO sui punteggi MSDx nel tempo

I punteggi MSD longitudinali per collo, spalla, polso e parte bassa della schiena sono mostrati nella Figura 4 e nelle Figure S1-S3 per la parte superiore del braccio, l'avambraccio e l'estremità inferiore. In tutte le regioni del corpo e nelle strutture, i punteggi MSD non erano significativamente diversi tra il gruppo EXO e il gruppo di controllo. I punteggi MSD per ciascuna delle regioni corporee considerate (eccetto la parte superiore del braccio) erano influenzati principalmente dal rispettivo valore basale ($p = <0,0001-0,026$). Anche i punteggi MSD della spalla erano positivamente associati alla massa corporea ($\beta = 0,008$, $SE = 0,004$, $p = 0,075$). Sebbene non statisticamente significativi, i punteggi MSD della spalla nel gruppo EXO sono diminuiti in una fase successiva dello studio, rispetto al gruppo di controllo. I punteggi MSD della parte

superiore del braccio, dell'avambraccio e della parte bassa della schiena erano abbastanza simili tra i gruppi sperimentali, mentre i punteggi MSD della parte superiore del braccio e dell'avambraccio erano generalmente bassi (punteggi mediani <5), indipendentemente dai gruppi sperimentali. Un riepilogo dei risultati del modello misto è presentato nella Tabella S3 nell'Appendice delle informazioni di supporto.

4 | DISCUSSIONE

Questo studio è stato il primo, a nostra conoscenza, a studiare gli effetti longitudinali dell'utilizzo di un ASE sul campo per un periodo di 18 mesi. Contrariamente ad alcune prove esistenti, i nostri risultati non suggeriscono effetti chiari dell'uso di ASE sull'intensità del lavoro o sui punteggi MSD. Piuttosto, tali effetti variavano sostanzialmente tra i partecipanti e dipendevano dalle strutture e dal tempo (cioè dalla durata dell'utilizzo). Questi risultati, infatti, suggeriscono la necessità di ulteriori indagini sulle strategie di implementazione degli EXO sul campo.

4.1 | ASE COME MODERATORE PER RIDURRE LE ESIGENZE FISICHE

Precedenti studi sul campo hanno indicato che gli ASE possono ridurre le richieste fisiche in un ambiente di lavoro reale, come evidenziato dalla riduzione dell'attività dei muscoli della spalla^{23,27} e della tensione percepita nel collo e nelle spalle o dai punteggi MSD.^{21,24} I nostri risultati, tuttavia, indicano che dopo aver tenuto conto di età, massa corporea, statura e domanda di lavoro, l'utilizzo di un ASE ha avuto un impatto minimo sull'intensità di lavoro percepita o sui punteggi MSD (Figura 3). Sebbene non vi siano state interazioni significative tra uso EXO × struttura × tempo, alcune strutture hanno mostrato modelli eccezionali degni di nota (vedere le figure S4-S7 nell'appendice delle informazioni di supporto). Esempi di tali eccezioni sono le strutture S2 e L1, in cui i punteggi dei DMS del collo sono diminuiti nel gruppo EXO nel tempo, dopo il traguardo dei 6 mesi (Figura S4). Anche nella struttura L1, il gruppo EXO ha mostrato una riduzione dei punteggi MSD della spalla al traguardo dei 18 mesi (Figura S4). Questi risultati, con eccezioni,

concordano con gli studi esistenti, sebbene gli effetti benefici (vale a dire, riduzioni dei punteggi MSD) non siano stati immediati e siano stati osservati solo dopo un lungo periodo di utilizzo di ASE (≥ 6 mesi). Questi risultati attuali, in particolare la presenza di soli effetti benefici specifici della struttura derivanti dall'uso dell'ASE, possono essere inaspettati, ma dovrebbero essere considerati nel contesto di diversi aspetti potenzialmente influenti.

Innanzitutto, le prove esistenti indicano che gli effetti dell'uso dell'ASE lo sono per un compito specifico.^{13,23,27} Anche per un lavoro che prevede posture elevate delle braccia, l'utilizzo di un ASE può avere un impatto minimo o negativo sulle richieste fisiche della spalla. Gillette e Stephenson²³ hanno esaminato l'uso dell'ASE per sei diversi lavori di assemblaggio che comportavano posture prolungate delle braccia elevate in due impianti di produzione di veicoli pesanti. Hanno scoperto che gli effetti benefici dell'uso dell'ASE variavano tra questi lavori e che l'uso in un lavoro portava effettivamente ad un aumento delle attività dei muscoli della spalla. Allo stesso modo, De Bock et al.²⁷ non hanno riportato effetti benefici dell'uso dell'ASE durante un lavoro di magazzino, posizionando i parabrezza su uno scaffale di stoccaggio all'altezza delle spalle.

Nel presente studio, gli specialisti di ergonomia hanno identificato i lavori candidati sopra la testa (cioè su una linea aerea dove il veicolo passa sopra gli operatori).

Ciò potrebbe trarre vantaggio dall'uso dell'ambiente del servizio app. È possibile che questo processo di identificazione, basato sulla semplice definizione del lavoro generale, fosse insufficiente per identificare i casi d'uso vantaggiosi per l'ambiente del servizio app. In pratica, anche se sono stati sviluppati criteri di selezione specifici, sarebbe comunque difficile selezionare lavori specifici seguendo i criteri poiché la partecipazione è volontaria.

In secondo luogo, gli effetti dell'uso dell'ASE sui livelli di attività muscolare variano sostanzialmente tra gli utenti.^{25,27} Qui sono stati generalmente osservati ampi intervalli di confidenza per i punteggi MSD di ciascuna regione del corpo e ciò potrebbe essere dovuto a differenze nell'antropometria (ad es. forme del corpo) e il luogo di lavoro fisico nelle strutture. Ad esempio, anche per lavori comparabili sopra la testa, i partecipanti potrebbero aver adottato diverse posture del corpo a seconda degli aspetti dell'ambiente di lavoro (ad esempio, posizione delle parti e spazio fisico).

In terzo luogo, il modello di utilizzo dell'ASE non è stato controllato nel presente studio; come notato in precedenza, ciò era il risultato del fatto che la partecipazione era volontaria. I partecipanti al gruppo EXO potevano utilizzare l'ASE in ogni turno per la durata che preferivano. In altri studi,^{12,23,27} un ASE è stato utilizzato per una durata prescritta. Smets²⁴ ha riportato un utilizzo medio giornaliero di ASE stimato di 7,6 ore, sebbene la durata di utilizzo non fosse prescritta. Tuttavia, gli utenti di quello studio avevano un piccolo team a supporto, che poteva reagire rapidamente a problemi di vestibilità o comfort. Nello studio corrente abbiamo inizialmente

implementato un contatore meccanico in ogni ambiente del servizio app per monitorare i modelli di utilizzo individuali, ma i dati ottenuti si sono rivelati inaffidabili. Ai partecipanti è stato chiesto di auto-segnalare il loro modello di utilizzo quotidiano utilizzando un modulo cartaceo, sebbene la stragrande maggioranza dei partecipanti non lo abbia fatto. Sebbene gli sforzi sistematici di raccolta dati non abbiano avuto successo, era chiaro che i modelli di utilizzo erano piuttosto variabili sia all'interno che tra i partecipanti, come l'utilizzo dell'ASE in un momento particolare durante un turno (ad esempio, verso la fine di un turno), durante un turno, e/o un giorno particolare (ad esempio, quando ci si sente stanchi). In quarto luogo, e forse il più importante, Ford adotta un rigoroso processo di ergonomia virtuale che, in base alla progettazione, ha progettato le postazioni di lavoro per ridurre al minimo le esigenze fisiche associate. Secondo gli standard ergonomici dell'azienda, gli operatori che eseguono lavori sopra la testa hanno un tempo limitato in cui possono lavorare sopra la testa per ogni ciclo. Di conseguenza, si è ritenuto che i lavori qui esaminati presentassero rischi bassi-moderati, anche se tutti i lavori comportavano spese generali e i partecipanti hanno indicato che l'intensità del loro lavoro è piuttosto elevata (Figura 3). In tali spazi di lavoro, può essere ragionevole aspettarsi che l'introduzione di un intervento ergonomico possa portare solo lievi miglioramenti nel disagio muscoloscheletrico percepito. Tuttavia, il fatto che possano essersi verificati alcuni vantaggi (anche se piccoli) supporta i potenziali vantaggi di un ASE per le attività di lavoro generali. Per guidare l'adozione degli ASE, saranno necessarie ulteriori indagini per determinare se tali piccole riduzioni del disagio muscoloscheletrico percepito portino a risultati positivi sulla salute.

I nostri risultati implicano anche che gli ASE potrebbero essere più efficaci per ambienti di lavoro in cui i controlli tecnici non possono essere facilmente modificati/progettati per ridurre le richieste fisiche (ad esempio, edilizia, miniere, manutenzione di edifici). Sono chiaramente necessarie ulteriori indagini per identificare meglio gli ambienti di lavoro specifici che può massimizzare i benefici EXO.

4.2 | Effetti imprevisti dell'utilizzo di un ASE sulle esigenze fisiche

L'uso dell'ASE ha avuto un impatto minimo sui punteggi MSD dell'avambraccio, della parte superiore del braccio e della parte bassa della schiena (Figura 4). Quando si indossa un ASE, i suoi componenti strutturali possono causare un'elevata pressione di contatto quando si interfacciano con le parti del corpo di chi lo indossa^{27,50} e aumentare i carichi su una diversa regione del corpo come la parte bassa della schiena.^{16,50} Tali effetti indesiderati non sono stati riscontrati qui in termini del disagio muscoloscheletrico (ad esempio, punteggi MSD), suggerendo che potrebbero non costituire ostacoli all'uso di ASE a lungo termine come intervento sul posto di lavoro. È interessante notare che, sebbene limitati alle strutture S3 e M1 (Figura S4), i punteggi MSD del polso per il

gruppo EXO sono rimasti costanti nel tempo, mentre quelli per il gruppo di controllo sono aumentati nel tempo. Questa divergenza nei punteggi può indicare che l'uso dell'ASE ha un'influenza di mediazione positiva, in quanto i partecipanti potrebbero aver lavorato in modo diverso quando utilizzavano un ASE e quindi ridurre il disagio cumulativo al polso. In via informale, i partecipanti hanno notato un periodo di adattamento iniziale nei loro schemi di movimento per adattarsi all'assistenza ASE. Tuttavia, sebbene specifico per la struttura L3 (Figura S7), un tale cambiamento nelle strategie di lavoro/modelli di movimento potrebbe anche aver contribuito ad un aumento dell'intensità di lavoro percepita e che potrebbe essere correlato a aspetti cognitivi (ad esempio, facilità d'uso) e aspetti di utilità (ad esempio, disturbo ai processi lavorativi), che sono componenti importanti dell'accettazione dell'EXO.⁵¹

4.3 | Limitazioni

Nonostante siano stati compiuti sforzi considerevoli per coordinare e gestire questo studio sul campo a lungo termine e su larga scala, i dati mancavano in misura crescente alle tappe fondamentali dello studio. Per affrontare le risposte mancanti è stata utilizzata l'imputazione multipla, che non presuppone alcun modello sistematico di mancanza. Abbiamo considerato questa ipotesi ragionevole, in quanto le risposte mancanti probabilmente dipendevano dalle circostanze dei singoli partecipanti (ad esempio, cambiamenti nel turno di lavoro, ferie). Occorre quindi prestare cautela nel generalizzare i risultati attuali. Come discusso in precedenza, i modelli di utilizzo non sono stati ottenuti con successo, non è chiaro in che misura la variabilità nelle variabili di risultato sia stata causata dalle differenze nei modelli di utilizzo. Quando si analizzano gli effetti longitudinali, soprattutto nel contesto di dati le cui caratteristiche di mancanza sono probabilmente legate all'abbandono nel tempo, sarebbe utile considerare strategie di imputazione alternative come un'imputazione condizionale in cui la mancanza stessa è una funzione dell'appartenenza al gruppo. uso o controllo EXO), struttura o livelli MSD. Sarebbe interessante studiare in uno studio più ampio anche un modello di serie temporali più sofisticato che tenga conto degli attuali livelli di MSD in funzione dei precedenti livelli di MSD. A causa dei dati limitati disponibili, tali approcci non sono stati ulteriormente esplorati in questo studio.

Inoltre, le sollecitazioni fisiche sugli arti superiori sono state stimate solo all'inizio dello studio, e questa stima era piuttosto semplicistica (riflettendo il carico complessivo sul complesso della spalla durante un lavoro). Un monitoraggio più dettagliato delle richieste fisiche durante lo studio potrebbe aver contribuito a delineare una linea longitudinale effetti dell'uso ASE e avrebbe contribuito retrospettivamente a una migliore selezione del lavoro per l'uso ASE. Il lavoro futuro dovrebbe quindi prendere in considerazione l'incorporazione di un metodo per registrare o monitorare le richieste fisiche nel complesso della spalla in modo

intermittente o continuo durante un intero periodo di studio.

5| CONCLUSIONI

Non sono stati riscontrati effetti longitudinali dell'uso dell'ASE sulle richieste fisiche percepite, sebbene alcuni risultati suggestivi ne fossero la prova. Questa mancanza di risultati coerenti potrebbe essere dovuta al fatto che le attuali postazioni di lavoro erano già ottimizzate dal punto di vista ergonomico, ma sottolinea anche aspetti importanti dell'implementazione ASE sul campo. I risultati attuali potrebbero derivare da una mancanza di approcci sistematici all'implementazione dell'EXO per selezionare efficacemente un lavoro da utilizzare ASE tenendo conto delle caratteristiche del lavoro e delle differenze individuali e dello spazio di lavoro. Con l'uso dell'ASE sono stati riscontrati alcuni cambiamenti nell'intensità del lavoro percepita e nei punteggi MSD del polso, il che potrebbe indicare che l'utilizzo di un ASE ha un'influenza sul modo in cui un lavoratore svolge il proprio lavoro. I futuri approcci all'implementazione dell'EXO dovrebbero tenere conto di tali influenze e, idealmente, quantificare eventuali cambiamenti nei metodi di lavoro come effetto moderatore e/o terapeutico. Gli studi futuri dovranno concentrarsi su implementazioni EXO sistematiche e basate sull'evidenza per colmare il divario tra i risultati degli studi di laboratorio e quelli sul campo, e raccomandiamo che tali studi includano una gamma più ampia di compiti e misure affidabili dell'utilizzo di EXO. Tali sforzi miglioreranno la progettazione dei futuri dispositivi EXO che funzionano efficacemente in un'ampia gamma di caratteristiche individuali, lavori e ambienti di lavoro.

RICONOSCIMENTI

Gli autori ringraziano Brad Sochacki della Ford Motor Company per l'aiuto con la raccolta e l'organizzazione dei dati, e il Comitato congiunto nazionale per la salute e la sicurezza UAW-Ford per il supporto nella pianificazione e nel completamento di questo studio. Il supporto per questo studio è stato fornito da una sovvenzione "Alliance" della Ford Motor Company alla Virginia Tech.

CONFLITTO D'INTERESSI

Gli autori dichiarano che non sussistono conflitti di interessi.

DIVULGAZIONE DI AJIM EDITORE DEL RECORD

John Meyer dichiara di non avere alcun conflitto di interessi nella decisione di revisione e pubblicazione relativa a questo articolo.

CONTRIBUTI DELL'AUTORE

Maury A. Nussbaum, Sunwook Kim e Marty Smets hanno partecipato all'ideazione e alla progettazione dell'opera. Marty Smets ha partecipato all'acquisizione dei dati. Maury A. Nussbaum, Sunwook Kim e Shyam Ranganathan hanno partecipato all'analisi e all'interpretazione dei dati per il lavoro. Maury A. Nussbaum e Sunwook Kim hanno redatto la bozza del lavoro e Marty Smets e Shyam Ranganathan hanno fornito un feedback critico.

Tutti gli autori hanno approvato la versione da pubblicare e accettano di essere responsabili di tutti gli aspetti del lavoro nel garantire che le questioni relative all'accuratezza o all'integrità di qualsiasi parte del lavoro siano adeguatamente indagate e risolte.

INFORMATIVA DISPONIBILITÀ DEI DATI

I dati che supportano i risultati di questo studio sono disponibili su richiesta presso l'autore corrispondente. I dati non sono disponibili al pubblico a causa della privacy o di restrizioni etiche.

APPROVAZIONE ETICA E CONSENSO INFORMATO

Questo studio è stato rivisto e approvato dal Comitato congiunto nazionale per la salute e la sicurezza della Ford Motor Company e dall'Institutional Review Board della Virginia Tech (VT IRB#: 18-353). Tutti i partecipanti sono stati reclutati volontariamente e hanno dato il consenso verbale per la partecipazione allo studio.

ORCID

Sunwook Kim  <https://orcid.org/0000-0003-3624-1781>
 Maury A. Nussbaum  <http://orcid.org/0000-0002-1887-8431>
 Marty Smets  <https://orcid.org/0000-0003-0974-6514>
 Shyam Ranganathan  <https://orcid.org/0000-0002-1337-5173>

RIFERIMENTI

- de Vries A, de Looze M. The effect of arm support exoskeletons in realistic work activities: a review study. *J Ergon* 2019;9(4):255.
- Rashedi E, Kim S, Nussbaum MA, Agnew MJ. Ergonomic evaluation of a wearable assistive device for overhead work. *Ergonomics*. 2014;57(12):1864-1874.
- Huysamen K, Bosch T, de Looze M, Stadler KS, Graf E, O'Sullivan LW. Evaluation of a passive exoskeleton for static upper limb activities. *Appl Ergon*. 2018;70:148-155.
- Alemi MM, Madinei S, Kim S, Srinivasan D, Nussbaum MA. Effects of two passive back-support exoskeletons on muscle activity, energy expenditure, and subjective assessments during repetitive lifting. *Hum Factors*. 2020;62(3):458-474.
- Schmalz T, Schändlinger J, Schuler M, et al. Biomechanical and metabolic effectiveness of an industrial exoskeleton for overhead work. *Int J Environ Res Public Health*. 2019;16(23):4792. <https://doi.org/10.3390/ijerph16234792>
- Baltrusch SJ, van Dieën JH, Bruijn SM, Koopman AS, van Bennekom CAM, Houdijk H. The effect of a passive trunk exoskeleton on functional performance and metabolic costs. *Ergonomics*. 2019:229-233.
- Alabdulkarim S, Kim S, Nussbaum MA. Effects of exoskeleton design and precision requirements on physical demands and quality in a simulated overhead drilling task. *Appl Ergon*. 2019;80:136-145.
- Kim S, Nussbaum MA, Esfahani MIM, Alemi MM, Alabdulkarim S, Rashedi E. Assessing the influence of a passive, upper extremity exoskeletal vest for tasks requiring arm elevation: part I –“Expected” effects on discomfort, shoulder muscle activity, and work task performance. *Appl Ergon*. 2018;70:315-322.
- Spada S, Ghibaudo L, Gilotta S, Gastaldi L, Cavatorta MP. Analysis of exoskeleton introduction in industrial reality: main issues and EAWS risk assessment. *Adv Phys Ergon Hum Factors*. 2018:236-244.
- Butler T. Exoskeleton technology: making workers safer and more productive. *Prof Safety*. 2016:32-36.
- Madinei S, Alemi MM, Kim S, Srinivasan D, Nussbaum MA. Bio-mechanical assessment of two back-support exoskeletons in symmetric and asymmetric repetitive lifting with moderate postural demands. *Appl Ergon*. 2020;88:103156.
- Theurel J, Desbrosses K, Roux T, Savescu A. Physiological consequences of using an upper limb exoskeleton during manual handling tasks. *Appl Ergon*. 2018;67:211-217.
- Kim S, Madinei S, Alemi MM, Srinivasan D, Nussbaum MA. Assessing the potential for “undesired” effects of passive back-support exoskeleton use during a simulated manual assembly task: muscle activity, posture, balance, discomfort, and usability. *Appl Ergon*. 2020;89:103194.
- de Looze MP, Bosch T, Krause F, Stadler KS, O'Sullivan LW. Exoskeletons for industrial application and their potential effects on physical work load. *Ergonomics*. 2016;59(5):671-681.
- Bosch T, van Eck J, Knitel K, de Looze M. The effects of a passive exoskeleton on muscle activity, discomfort and endurance time in forward bending work. *Appl Ergon*. 2016;54:212-217.
- Kim S, Nussbaum MA, Mokhlespour Esfahani MI, Alemi MM, Jia B, Rashedi E. Assessing the influence of a passive, upper extremity exoskeletal vest for tasks requiring arm elevation: part II –“Unexpected” effects on shoulder motion, balance, and spine loading. *Appl Ergon*. 2018;70:323-330.
- Abdoli-E M, Agnew MJ, Stevenson JM. An on-body personal lift augmentation device (PLAD) reduces EMG amplitude of erector spinae during lifting tasks. *Clin Biomech*. 2006;21(5):456-465.
- Toxiri S, Ortiz J, Masood J, Fernandez J, Mateos LA, Caldwell DG. A wearable device for reducing spinal loads during lifting tasks: Biomechanics and design concepts. In 2015 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO); 2015. 13:549-556. <https://doi.org/10.1109/robio.2015.7419116>
- Howard J, Murashov VV, Lowe BD, Lu M-L. Industrial exoskeletons: need for intervention effectiveness research. *Am J Ind Med*. 2020;63(3):201-208.
- Nussbaum MA, Lowe BD, de Looze M, Harris-Adamson C, Smets M. An introduction to the special issue on occupational exoskeletons. *IIEE Trans Occup Ergon Hum Factors*. 2019;7(3-4):153-162.
- Hefferle M, Snell M, Kluth K. Influence of two industrial overhead exoskeletons on perceived strain—a field study in the automotive industry. In: Zallio M, (Ed.). *Advances in Human Factors in Robots, Drones and Unmanned Systems*. Cham: Springer; 2021:94-100.
- Hensel R, Keil M. Subjective evaluation of a passive industrial exoskeleton for lower-back support: a field study in the automotive sector. *IIEE Trans Occup Ergon Hum Factors*. 2019;7(3-4):213-221.
- Gillette JC, Stephenson ML. Electromyographic assessment of a shoulder support exoskeleton during on-site job tasks. *IIEE Trans Occup Ergon Hum Factors*. 2019;7(3-4):302-310.
- Smets M. A field evaluation of arm-support exoskeletons for overhead work applications in automotive assembly. *IIEE Trans Occup Ergon Hum Factors*. 2019;7(3-4):192-198.
- Amandels S, Eynndt HOH, Daenen L, Hermans V. Introduction and testing of a passive exoskeleton in an industrial working environment. In Bagnara S, Tartaglia R, Albolino S, Alexander T, Fujita Y, (Eds.). *Proceedings of the 20th Congress of the International Ergonomics Association (IEA 2018)*. Springer International Publishing; 2019:387-392.
- Motmans R, Debaets T, Chrispeels S. Effect of a passive exoskeleton on muscle activity and posture during order picking. In Bagnara S, Tartaglia R, Albolino S, Alexander T, Fujita Y, (Eds.). *Proceedings of the 20th Congress of the International Ergonomics Association (IEA 2018)*. Springer International Publishing; 2019:338-346.
- De Bock S, Ghillebert J, Govaerts R, et al. Passive shoulder exoskeletons: more effective in the lab than in the field? *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*. 2021;29:173-183.
- Omoniyi A, Trask C, Milosavljevic S, Thamsuwan O. Farmers' perceptions of exoskeleton use on farms: finding the right tool for the work(er). *Int J Ind Ergon*. 2020;80:103036.
- Thamsuwan O, Milosavljevic S, Srinivasan D, Trask C. Potential exoskeleton uses for reducing low back muscular activity during farm tasks. *Am J Ind Med*. 2020;63(11):1017-1028.

30. Marino M. Impacts of using passive back assist and shoulder assist exoskeletons in a wholesale and retail trade sector environment. *IJSE Trans Occup Ergon Hum Factors*. 2019;7(3-4):281-290.
31. Rupp MA, Michaelis JR, McConnell DS, Smither JA. The role of individual differences on perceptions of wearable fitness device trust, usability, and motivational impact. *Appl Ergon*. 2018;70:77-87.
32. Karahanoğlu A, Erbuğ Ç. Perceived qualities of smart wearables: determinants of user acceptance. Proceedings of the 2011 Conference on Designing Pleasurable Products and Interfaces. *DPPI '11*. Association for Computing Machinery; 2011:1-8.
33. Ford Media Center. Called EksoVest, the wearable technology elevates and supports a worker's arms while performing overhead tasks. 2017. Retrieved from <https://media.ford.com/content/fordmedia/fna/us/en/news/2017/11/09/ford-exoskeleton-technology-pilot.html>
34. Aptel M, Aublet-Cuvelier A, Cnockaert JC. Work-related musculoskeletal disorders of the upper limb. *Joint Bone Spine*. 2002;69(6):546-555.
35. Armstrong TJ, Buckle P, Fine LJ, et al. A conceptual model for work-related neck and upper-limb musculoskeletal disorders. *Scand J Work Environ Health*. 1993;19(2):73-84.
36. Brown SP, Leigh TW. A new look at psychological climate and its relationship to job involvement, effort, and performance. *J Appl Psychol*. 1996;81(4):358-368.
37. Hedge A, Morimoto S, McCrobie D. Effects of keyboard tray geometry on upper body posture and comfort. *Ergonomics*. 1999;42(10):1333-1349.
38. Cole DC, Wells RP, Frazer MB, et al. Methodological issues in evaluating workplace interventions to reduce work-related musculoskeletal disorders through mechanical exposure reduction. *Scand J Work Environ Health*. 2003;29(5):396-405.
39. Kreuzfeld S, Seibt R, Kumar M, Rieger A, Stoll R. German version of the Cornell Musculoskeletal Discomfort Questionnaire (CMDQ): translation and validation. *J Occup Med Toxicol*. 2016;11:13.
40. Erdinc O, Hot K, Ozkaya M. Turkish version of the Cornell Musculoskeletal Discomfort Questionnaire: cross-cultural adaptation and validation. *Work*. 2011;39(3):251-260.
41. Hedge A. Cornell Musculoskeletal Discomfort Questionnaires (CMDQ). Cornell University Ergonomics Web. <http://www.ergo.human.cornell.edu/ahmsquest.html>
42. Colombini D, Occhipinti E, Álvarez-Casado E. *The Revised OCRA Checklist Method*. Barcelona: Editorial Factors Humans; 2013.
43. R Core Team. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing; 2021. <https://www.R-project.org/>
44. Bates D, Mächler M, Bolker B, Walker S. Fitting linear mixed-effects models using lme4. *Journal of Statistical Software*, 2015;67(1):1-48.
45. White IR, Royston P, Wood AM. Multiple imputation using chained equations: Issues and guidance for practice. *Stat Med*. 2011;30(4):377-399.
46. Rubin DB. *Multiple Imputation for Nonresponse in Surveys*. 81. Hoboken: John Wiley & Sons; 2004.
47. van Buuren S, Groothuis-Oudshoorn K. Mice: multivariate imputation by chained equations in R. *J Stat Softw*. 2011;45(3). <https://doi.org/10.18637/jss.v045.i03>
48. Graham JW, Olchowski AE, Gilreath TD. How many imputations are really needed? Some practical clarifications of multiple imputation theory. *Prev Sci*. 2007;8(3):206-213.
49. Twisk J, de Boer M, de Vente W, Heymans M. Multiple imputation of missing values was not necessary before performing a longitudinal mixed-model analysis. *J Clin Epidemiol*. 2013;66(9):1022-1028.
50. Alabdulkarim S, Nussbaum MA. Influences of different exoskeleton designs and tool mass on physical demands and performance in a simulated overhead drilling task. *Appl Ergon*. 2019;74:55-66.
51. Moyon A, Poirson E, Petiot J-F. Development of an acceptance model for occupational exoskeletons and application for a passive upper limb device. *IJSE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*. 2019;7(3-4):291-301. <https://doi.org/10.1080/24725838.2019.1662516>

INFORMAZIONI DI SUPPORTO

Ulteriori informazioni di supporto possono essere trovate online nella scheda Informazioni di supporto di questo articolo.

Come citare questo articolo: Kim S, Nussbaum MA, Smets M, Ranganathan S. Effetti di un esoscheletro di supporto del braccio sull'intensità di lavoro percepita e sul disagio muscoloscheletrico: uno studio sul campo di 18 mesi nell'assemblaggio automobilistico. *Am J Ind Med*. 2021;64:905-914. <https://doi.org/10.1002/ajim.23282>

BREVE ARTICOLO

Usabilità, accettazione da parte dell'utente e risultati sulla salute dell'uso dell'esoscheletro di supporto del braccio nell'assemblaggio automobilistico

Uno studio sul campo di 18 mesi

Sunwook Kim, PhD, Maury A. Nussbaum, PhD, and Marty Smets, MS

Obiettivo: esaminare l'esperienza dell'utente dell'esoscheletro di supporto del braccio (ASE) nel tempo, identificare i fattori che contribuiscono all'intenzione di utilizzare l'ASE ed esplorare se l'uso dell'ASE può influenzare il numero di visite mediche. **Metodi:** uno studio longitudinale di 18 mesi con ASE (n = 65) e gruppi di controllo (n = 133) completato in nove stabilimenti di produzione automobilistica. **Risultati:** le risposte a sei domande sull'usabilità sono state piuttosto coerenti nel tempo. L'uso dell'ASE è percepito come efficace nel ridurre le sollecitazioni fisiche su spalle, collo e schiena. La prestazione lavorativa percepita, l'idoneità generale e il comfort sembravano essere determinanti chiave per l'intenzione di utilizzo dell'ASE. Sulla base delle visite mediche tra entrambi i gruppi, l'uso di ASE può ridurre la probabilità di tali visite. **Conclusioni:** questi risultati sul campo supportano il potenziale degli ASE come intervento ergonomico benefico, ma evidenziano anche la necessità di ulteriori ricerche sulla progettazione degli ASE, sui fattori che guidano l'intenzione all'uso e sui risultati sulla salute.

Parole chiave: intervento ergonomico, lavoro in testa, studio prospettico, robot indossabile

I disturbi muscoloscheletrici legati al lavoro degli arti superiori (UE-WMSD) rimangono un importante problema di salute sul lavoro.

Negli Stati Uniti, nel 2019, il 7,6% dei casi di giorni lavorativi persi erano dovuti a problemi alla spalla legati al lavoro, con una media di 22 giorni lavorativi persi (cfr. una media di sette giorni lavorativi persi per problemi alla schiena).¹ La spalla è tra le regioni del corpo che comportano il costo più elevato per le richieste di indennizzo dei lavoratori statunitensi in tutti i settori 2 e nella

produzione automobilistica in particolare. 3 La letteratura epidemiologica indica che lo sviluppo di UE-WMSD è associato positivamente con esposizioni fisiche professionali come compiti ripetitivi, posture, sforzi energici e lavoro sopra la testa.⁴⁻⁶ Sebbene siano stati utilizzati diversi interventi per controllare tali esposizioni, può rappresentare una sfida importante ridurre o prevenire UE-WMSD per alcune attività lavorative, come attività di assemblaggio o manutenzione che richiedono elevazione prolungata/ripetitiva del braccio.

From the Department of Industrial & Systems Engineering, Virginia Tech, Blacksburg, Virginia (Dr Kim, Dr Nussbaum); Manufacturing Technology Development, Ford Motor Company, Glendale, Michigan (Mr Smets).

Funding Sources: Support for this work was provided by an "Alliance" grant from Ford Motor Company to Virginia Tech.

Conflicts of interest: None declared.

Ethical Consideration & Disclosure(s): This study was reviewed and approved by the National Joint Committee for Health and Safety at Ford Motor Company and by the Institutional Review Board at Virginia Tech (VT IRB#: 18-353). All participants were recruited voluntarily and gave verbal consent for study participation.

Clinical significance: In an 18-month study of arm-support exoskeleton (ASE) use in automotive manufacturing, usability responses were consistent over time and ASEs appeared effective in reducing physical demands. Perceived performance, and fit and comfort, were key determinants for ASE intention-to-use. ASE use also may decrease the likelihood of a work-related medical visit.

Supplemental digital contents are available for this article. Direct URL citation appears in the printed text and is provided in the HTML and PDF versions of this article on the journal's Web site (www.joem.org).

Address correspondence to: Maury A. Nussbaum, PhD, Virginia Tech, 250 Durham Hall (0118), Blacksburg, VA 24061 (nussbaum@vt.edu).

Copyright © 2021 American College of Occupational and Environmental Medicine DOI: 10.1097/JOM.0000000000002438

La recente comparsa delle tecnologie dell'esoscheletro (EXO) offre un nuovo approccio di intervento.

Gli EXO sono definiti come "un dispositivo indossabile che aumenta, abilita, assiste o migliora il movimento, la postura o l'attività fisica" dal Comitato tecnico internazionale ASTM su esoscheletri ed esoscheletri (ASTM F48).⁷ Un'applicazione professionale comune è l'armatura esoscheletri di supporto (ASE), progettati per ridurre le sollecitazioni fisiche sulla spalla. Revisioni recenti sottolineano che l'efficacia degli ASE è ben supportata da numerosi studi trasversali condotti in laboratorio.^{8,9} Infatti, molti studi hanno dimostrato che l'uso di un ASE può ridurre l'attività muscolare della spalla (ad esempio, i gruppi muscolari deltoide e trapezio), sforzo percepito e affaticamento muscolare localizzato.¹⁰⁻¹⁴ Entrambe le revisioni, tuttavia, hanno evidenziato anche la mancanza di prove forti sull'efficacia e l'idoneità degli ASE sulla base di studi sul campo a lungo termine.

Sebbene siano ancora molto più scarsi rispetto agli studi di laboratorio, un numero crescente di studi ha riportato risultati derivanti dall'utilizzo di ASE in contesti sul campo.¹⁵⁻²¹ Questi studi generalmente hanno supportato i risultati di studi di laboratorio, dimostrando che l'utilizzo di un ASE può ridurre le prestazioni fisiche, sollecitazioni sulla spalla (ad esempio, ridotta attività muscolare nella regione della spalla, disagio/fatica percepita). È interessante notare, tuttavia, che De Bock et al.¹⁹ hanno confrontato gli impatti dell'utilizzo di un ASE tra il laboratorio e gli ambienti di lavoro reali, scoprendo che l'entità degli effetti benefici dell'uso dell'ASE era inferiore in quest'ultimo. Abbiamo anche osservato impatti positivi relativamente piccoli dell'utilizzo di un ASE sul disagio al collo e alle spalle durante un test sul campo di 18 mesi in un ambiente di assemblaggio automobilistico,²¹ che contrasta con benefici più sostanziali ottenuti in precedenti studi di laboratorio che hanno esaminato lo stesso o altri ASE.^{10,22}

Precedenti studi sul campo hanno anche rivelato problemi di usabilità e sicurezza che spesso non erano completamente identificati o compresi dagli studi di laboratorio. Tali preoccupazioni includono la difficoltà nel percepire i carichi immediatamente dopo aver tolto l'EXO16 e l'importanza del comfort termico.¹⁵ Inoltre,

Amandels et al.²³ hanno esaminato un esoscheletro con supporto per la schiena (BSE) in un'officina di produzione e hanno suggerito che il disagio derivante dall'indossare l'ESB supera i benefici effetti. Hanno attribuito questo al fatto che i lavoratori svolgono compiti diversi (cioè non solo sollevamenti) e che un ambiente di lavoro reale può essere più impegnativo di un tipico laboratorio (ad esempio, calore, rumore, pressione di lavoro). Hensel e Keil²⁴ hanno notato che l'utilizzo di un BSE può costituire una distrazione durante i compiti ausiliari, influenzando negativamente l'usabilità percepita e l'accettazione da parte dell'utente (cioè l'intenzione di utilizzo). Questi studi suggeriscono che esiste una sfida nell'ottenere l'accettazione da parte degli utenti con una BSE sul campo.

Se i lavoratori accetteranno un ASE, tuttavia, è una questione fondamentale per promuoverne l'uso sul campo, indipendentemente dall'efficacia di un ASE nel ridurre le esigenze fisiche. Alcuni studi sul campo hanno indicato che l'utilità percepita e il comfort di un EXO sono determinanti chiave.²⁴⁻²⁶ Tuttavia, i risultati di questi studi si basavano sulle esperienze degli utenti con un EXO che variava da meno di 1 ora a un periodo di 4 settimane. È importante sottolineare che nessuno di questi studi o studi correlati ha ancora riportato se l'uso dell'ASE può portare alla riduzione degli infortuni. Pertanto, sono necessarie valutazioni a lungo termine per comprendere se l'usabilità percepita e le opinioni relative all'utilizzo dell'ASE

sono stabili nel tempo e per esplorare i risultati sulla salute con l'uso dell'ASE. Per rispondere a queste esigenze, abbiamo condotto uno studio prospettico e controllato sul campo utilizzando un ASE tra i lavoratori di diversi impianti di assemblaggio automobilistico, per un periodo di 18 mesi. Questo disegno prospettico ci ha permesso di esaminare l'esperienza dell'utente ASE nel tempo, identificare i fattori che contribuiscono all'intenzione di utilizzare l'ASE ed esplorare se l'uso dell'ASE può contribuire a risultati positivi sulla salute.

METODI

La raccolta dei dati è avvenuta nel corso di 18 mesi come parte di uno studio più ampio che prevedeva una collaborazione tra ricercatori accademici e specialisti di ingegneria ed ergonomia presso un grande produttore automobilistico nordamericano. Questo studio è stato esaminato e approvato dal Comitato congiunto nazionale per la salute e la sicurezza UAW/Ford e dall'Institutional Review Board del Virginia Tech. Una descrizione dettagliata dei partecipanti, del disegno sperimentale e delle procedure può essere trovata in un documento allegato²¹; pertanto, di seguito viene fornita solo una panoramica.

Partecipanti

Tutti i partecipanti erano operatori di assemblaggio finale che lavoravano quotidianamente su una linea aerea e che eseguivano lavori di assemblaggio dal basso sulla sottoscocca di un veicolo. I partecipanti sono stati reclutati da nove stabilimenti di produzione automobilistica nel Nord America e hanno partecipato tra aprile 2018 e dicembre 2019. Un totale di 65 e 133 partecipanti sono stati reclutati su base volontaria rispettivamente in un gruppo ASE e in un gruppo di controllo. Si sono verificati ritiri dallo studio, principalmente per trasferimenti di lavoro a lavori non generali o perdita di interesse, e hanno coinvolto 24 partecipanti (36,9%) nel gruppo ASE e 50 (37,6%). Inoltre, due impianti di produzione hanno subito importanti modifiche poco dopo l'inizio dello studio, e i dati di questi impianti sono



stati esclusi da ulteriori analisi. Pertanto, nelle analisi finali, abbiamo incluso un totale di 41 partecipanti nel gruppo ASE (30 uomini, 3 donne e 8 non segnalati) e 83 nel gruppo di controllo (47 uomini, 14 donne e 22 non segnalati). Le rispettive medie (intervallo interquartile: da Q3 a Q1) di età, massa corporea e statura erano 38,0 (15,0) anni, 83,9 (21,5) kg e 1,79 (0,1) m per il gruppo ASE; e 38 (15) anni, 86,2 (23,5) kg e 1,75 (0,10) m per il gruppo di controllo.

Progettazione e procedure sperimentali

Per ottenere dati in situ riguardanti l'uso dell'ASE è stato utilizzato un disegno di ricerca longitudinale e controllato. Le risposte percettive sono state raccolte tramite questionari, descritti di seguito, al basale (ovvero, il giorno in cui è iniziata la partecipazione, senza utilizzo di ASE), e di nuovo a quattro tappe fondamentali dopo il basale, in particolare dopo 1, 6, 12 e 18 mesi (ovvero, M1, M6, M12 e M18). I dati del questionario sono stati ottenuti da specialisti locali di ergonomia in corrispondenza delle quattro tappe fondamentali. Se i partecipanti non erano disponibili il giorno della raccolta dei dati, veniva tentata la raccolta di follow-up. L'ASE utilizzato da ciascun partecipante era l'EksoVest (Ekso Bionics, Inc., Richmond, CA; massa unitaria 4,3 kg; Fig. 1). Questo ASE includeva un cuscino per il collo a forma di U e imbottiture per la schiena e poteva essere regolato in termini di lunghezza del tronco, lunghezza della cintura in vita e dimensione del polsino.

FIGURA 1. Esempio di un operatore di assemblaggio che esegue un'attività mentre utilizza EksoVest.²⁷

Raccolta Dati

Ad ogni traguardo, ai partecipanti è stato chiesto di rispondere alle domande elencate di seguito relative all'usabilità, utilizzando una scala da 0 a 10; le domande sono state modificate rispetto a studi precedenti.^{28,29} È stato inoltre chiesto loro di fornire un feedback aperto a ciascuna domanda tranne quella riguardante il comfort termico:

- Vestibilità e comfort complessivi: "Qual è la tua percezione della vestibilità e del comfort complessivi dell'esoscheletro durante l'esecuzione del tuo lavoro?": 0 = nessun disagio e 10 = massimo disagio.
- Comfort termico: "Qual è la tua percezione tipica del comfort termico (e/o della sensazione di sudorazione)?": 0 = nessun disagio e 10 = massimo disagio.
- Equilibrio percepito: "Qual è la tua percezione dell'equilibrio (o qualsiasi altra cosa?) (senso di squilibrio) durante l'utilizzo dell'esoscheletro": 0=perfetto bilanciato e 10= fuori equilibrio
- Gamma di movimento percepita (ROM): "Ritieni che la tua gamma di movimento sia stata limitata durante l'utilizzo dell'esoscheletro": 0 = nessuna limitazione e 10 = estremamente limitante.
- Sicurezza lavorativa complessiva percepita: "Quando usi l'esoscheletro per svolgere il tuo lavoro, come ritieni che ciò abbia influito sulla tua sicurezza complessiva": 0 sostanzialmente meno sicuro, 5 nessuna differenza e 10 sostanzialmente più sicuro.
- Prestazione lavorativa percepita: "Nel complesso, l'uso dell'esoscheletro influisce positivamente o negativamente sulle tue prestazioni?": 0 sostanzialmente peggiore, 5 nessuna differenza e 10 sostanzialmente migliore.

Ai partecipanti è stato inoltre chiesto di rispondere a tre domande a risposta aperta: "Cosa ti piace di più dell'esoscheletro?" (Mi piace); "Cosa ti piace meno dell'esoscheletro?" (Non mi piace); e "Se potessi cambiare qualcosa riguardo all'esoscheletro, cosa cambieresti?" (Cambiamento). A M12 e M18, ai partecipanti è stato chiesto di condividere le loro sensazioni generali riguardo all'esoscheletro (positivo, neutro o negativo) e di indicare la loro intenzione di usarlo in futuro ("sì" o "no", anche se alcuni riportano "forse"). Tra gli intervistati a questa domanda sull'intenzione, tre partecipanti hanno fornito risposte ad entrambi i traguardi e le loro risposte erano coerenti. Pertanto, abbiamo incluso nell'analisi solo le loro prime risposte. Il questionario utilizzato è presentato nell'Appendice A, <http://links.lww.com/JOM/B37>.

Durante tutto il periodo di studio, il personale sanitario sul lavoro della struttura ha registrato tutte le visite mediche effettuate all'infermiere in loco, seguendo il processo

Analisi Statistica

Tutte le analisi statistiche sono state condotte sui dati del gruppo ASE, salvo diversa indicazione, utilizzando il software R.³¹ Data la natura esplorativa del lavoro, la significatività statistica è stata determinata a $P < 0,1$. Per valutare i cambiamenti temporali nelle risposte a ciascuna delle domande relative all'usabilità, separare la stima generalizzata le equazioni (GEE) erano adatte. Questi modelli includevano il tempo, la struttura e la loro interazione come variabili predittive, insieme all'età, alla massa corporea, alla statura e alla stagione calda/fredda come covariate. Abbiamo eseguito GEE utilizzando dati imputati utilizzando la funzione `geeglm`.³² Approssimativamente, il 40% delle risposte alle domande sull'usabilità sono mancate a causa del ritiro e dell'indisponibilità dei partecipanti. Per risolvere questo problema, abbiamo utilizzato l'imputazione multipla multivariata con `bootstrap`. Abbiamo imputato le risposte alle domande relative all'usabilità generando 2000 set di dati completati utilizzando la funzione `bootMice` nel pacchetto `bootImpute`.³³ Successivamente, abbiamo adattato GEE

standard di gestione della salute e sicurezza sul lavoro e degli infortuni. Le prime visite lavorative (FTOV) sono state incluse per ulteriori analisi solo se la preoccupazione segnalata era classificata come correlata all'"ergonomia" (cioè associata a distorsioni/stiramenti) nell'arto superiore o nella schiena. Abbiamo escluso qualsiasi incidente che coinvolga le dita. Nei sette siti della struttura e nel periodo di 18 mesi, sono state registrate un totale di 41 e sei visite mediche rispettivamente nei gruppi di controllo e ASE. Le parti del corpo più comuni riportate in queste visite erano la spalla e il polso (vedere Appendice B per i dettagli, <http://links.lww.com/JOM/B37>). Nessuna delle visite incluse ha comportato una perdita di giorni lavorativi. Si noti che il tasso più ampio del settore di casi di perdita di giornate lavorative a causa di sforzo eccessivo e reazioni fisiche era di 105 per 10.000 dipendenti a tempo pieno nella produzione automobilistica.³⁰

separati su ciascun set di dati imputati e combinato i coefficienti stimati e gli errori standard utilizzando la funzione `bootImputeAnalyse` in il pacchetto. Si noti che abbiamo considerato le risposte alle domande relative all'usabilità (cioè scale da 0 a 10) come una scala a intervalli.³⁴ Il feedback aperto è stato inizialmente esplorato utilizzando il pacchetto `tidytext`³⁵ per identificare le parole ad alta frequenza. Quindi, il feedback letterale insieme alle parole ad alta frequenza sono stati esaminati e classificati dall'autore principale. Per ciascuna domanda sono state riepilogate le categorie identificate.

Per esaminare la misura in cui le risposte all'usabilità- La domanda correlata era associata all'intenzione di utilizzare l'ASE (Sì/No), è stata eseguita un'analisi di regressione logistica multipla sui dati originali (cioè non imputati). Abbiamo utilizzato i valori mediani delle risposte a ciascuna domanda relativa all'usabilità attraverso le tappe fondamentali come input (a causa dei dati mancanti). Le risposte alla domanda sul saldo erano generalmente vicine allo zero, quindi era

adatto un modello di regressione logistica, includendo tutte le domande relative all'usabilità (eccetto il saldo) come variabili esplicative. Si noti che tre partecipanti hanno riferito "forse" e le loro risposte sono state escluse. Per integrare i risultati della regressione logistica multipla, è stata eseguita un'analisi dell'albero decisionale per identificare potenziali percorsi decisionali che contribuiscono all'intenzione di utilizzare l'ASE, utilizzando la funzione albero delle interferenze condizionali (ctree) del pacchetto delle parti.³⁶ Data la natura esplicativa di quest'ultima analisi, è stato utilizzato ctree poiché utilizza procedure di inferenza statistica durante la suddivisione per: (1) evitare di selezionare un predittore che massimizza la separazione (cioè fonte di potenziale distorsione da selezione); (2) accogliere tutti i tipi di risposte e variabili esplicative; e (3) correggere per test multipli su diversi predittori.

Abbiamo anche esplorato se l'utilizzo dell'ASE abbia influenzato il numero di visite mediche durante il periodo di studio. Come sopra annotato, inclusi in questa analisi sono stati solo gli incidenti associati a distorsioni/stiramenti. È stata eseguita un'analisi di regressione dei rischi proporzionali multipli di Cox per stimare i rapporti di rischio per le visite mediche tra i gruppi ASE e di controllo, utilizzando la funzione `coxph`,³⁷ includendo età, massa corporea e statura come covariate. Nei casi di visite mediche multiple è stata utilizzata la formulazione del gap time; il gap time è il tempo trascorso dall'evento precedente e l'indice temporale viene azzerato dopo l'evento.³⁸ L'ipotesi di un rischio proporzionale è stata esaminata utilizzando i residui di Schoenfeld scalati,³⁹ e questa ipotesi è stata soddisfatta.

RISULTATI

Risposte a domande relative all'uso

Un riepilogo dei risultati GEE è presentato nell'Appendice C, <http://links.lww.com/JOM/B37>, e le risposte longitudinali alle domande sono mostrate nella Fig. 2. In generale, le risposte a tutte le domande sono rimaste statisticamente coerenti nel tempo e in tutte le strutture, con un'eccezione. Per quanto riguarda quest'ultima, le risposte alla domanda sul ROM percepito hanno avuto un'intercetta significativamente più

alta per la struttura S2, rispetto al riferimento (cioè, struttura S1; Appendice C, <http://links.lww.com/JOM/B37>). In media, i partecipanti hanno indicato preoccupazioni minori sull'idoneità generale e sul disagio, preoccupazioni da moderate ad alte riguardo al disagio termico, preoccupazioni minime sull'equilibrio, preoccupazioni minori sul ROM percepito, sicurezza percepita equivalente o leggermente migliore e prestazioni lavorative percepite leggermente migliori.

Le cinque categorie più frequenti di commenti ottenuti per ciascuna delle domande relative all'usabilità sono presentate nella Tabella 1, insieme ai rispettivi esempi. Le categorie con la stessa frequenza sono state contate una volta e non sono stati fatti commenti per la domanda sul comfort termico.

Feedback a risposta aperta

La Figura 3 mostra le cinque categorie più frequenti di commenti ottenuti da ciascuna delle domande a risposta aperta (Mi piace, Non mi piace e Cambia). La maggior parte dei commenti (64,1%) dalla domanda Mi piace ha indicato che ai partecipanti è piaciuto il supporto del braccio fornito dall'esoscheletro e la relativa riduzione dello sforzo/disagio della spalla e di altre parti del corpo (ad esempio braccio, schiena e collo). Le categorie di commenti ottenuti dalle domande Non mi piace e Cambiamento erano piuttosto simili e sembrava che i partecipanti dessero priorità al miglioramento degli aspetti legati all'adattamento e al comfort dell'ASE. Le cinque categorie più frequenti riguardanti il cambiamento riguardavano il miglioramento del disagio termico, il bracciale, l'ingombro, il peso ASE e la struttura rigida del tronco. Queste categorie sono state seguite migliorando il tempo per indossare e togliere l'ASE (5,5%), il ROM (5,5%) e il comfort della cintura (4,3%).

Intenzione di utilizzo ASE

Sedici partecipanti hanno risposto "sì" riguardo alla loro futura intenzione di utilizzare l'ASE e 11 hanno risposto "no". La tabella 2 fornisce i

risultati dell'analisi di regressione logistica che ha esaminato i contributi delle risposte alle domande relative all'usabilità (tranne la questione del bilanciamento) all'intenzione di utilizzo. La prestazione lavorativa percepita era l'unico predittore statisticamente significativo. Il coefficiente del modello ha indicato che le probabilità di utilizzare l'ASE aumentano del 179% per un aumento unitario della prestazione lavorativa percepita.

La figura 4 mostra l'albero decisionale generato per identificare i fattori che contribuiscono all'intenzione di utilizzare l'ambiente del servizio app. Questo albero è composto da cinque nodi, il cui nodo radice è "Prestazioni lavorative percepite". Quando le prestazioni lavorative percepite erano inferiori o uguali a 6,5, il 70% degli intervistati ha riferito di non avere intenzione di utilizzare l'ASE. Quando la prestazione lavorativa percepita era superiore a 6,5, tutti gli intervistati che avevano una risposta relativa all'idoneità generale e al comfort inferiore o uguale a 4,7 hanno riferito "Sì" per quanto riguarda l'intenzione di utilizzo. Quando la vestibilità e il comfort complessivi erano superiori a 4,7, solo il 60% degli intervistati ha dichiarato "Sì" riguardo all'intenzione di utilizzo.

Visite Mediche

I risultati dell'analisi di regressione dei rischi proporzionali di Cox sono mostrati in Fig. 5. La probabilità di una visita medica era influenzata in modo significativo dall'età (P 0,03, rapporto di rischio 0,95) e dall'uso di EXO (P 0,09, rapporto

di rischio 0,48). La probabilità di effettuare una visita medica diminuiva del 5% con l'aumento unitario dell'età e del 52% quando veniva utilizzato l'ASE. Le curve di sopravvivenza sono mostrate in Fig. 5; la sopravvivenza mediana è stata di 580 giorni per il gruppo di controllo e questo livello non è stato raggiunto per il gruppo ASE.

DIBATTITO

Abbiamo esaminato diverse risposte relative all'uso di un ambiente del servizio app in un ambiente di produzione automobilistica per un periodo di 18 mesi. Le risposte degli utenti ASE alle sei domande relative all'usabilità sono rimaste piuttosto coerenti nel tempo (Fig. 2). Il feedback dei partecipanti ha indicato che l'utilizzo di un ASE è stato percepito efficace nel ridurre le sollecitazioni fisiche sulle spalle (e possibilmente sul collo e/o sulla schiena) durante l'effettivo assemblaggio automobilistico.

Il feedback dei partecipanti, tuttavia, ha evidenziato preoccupazioni relative alla progettazione dell'ASE utilizzato nello studio (ad esempio, profilo, peso) e alla sua interfaccia fisica con i segmenti del corpo dell'utente (ad esempio, polsino, cintura in vita). I fattori chiave determinanti dell'intenzione d'uso dell'esoscheletro sembravano coinvolgere le prestazioni percepite, nonché la vestibilità e il comfort complessivi. Sono state inoltre ottenute informazioni che suggerivano la possibilità che l'uso dell'ASE diminuisse la probabilità di un incidente medico correlato al lavoro. Ciascuno di questi risultati principali verrà discusso successivamente in maggiore dettaglio.

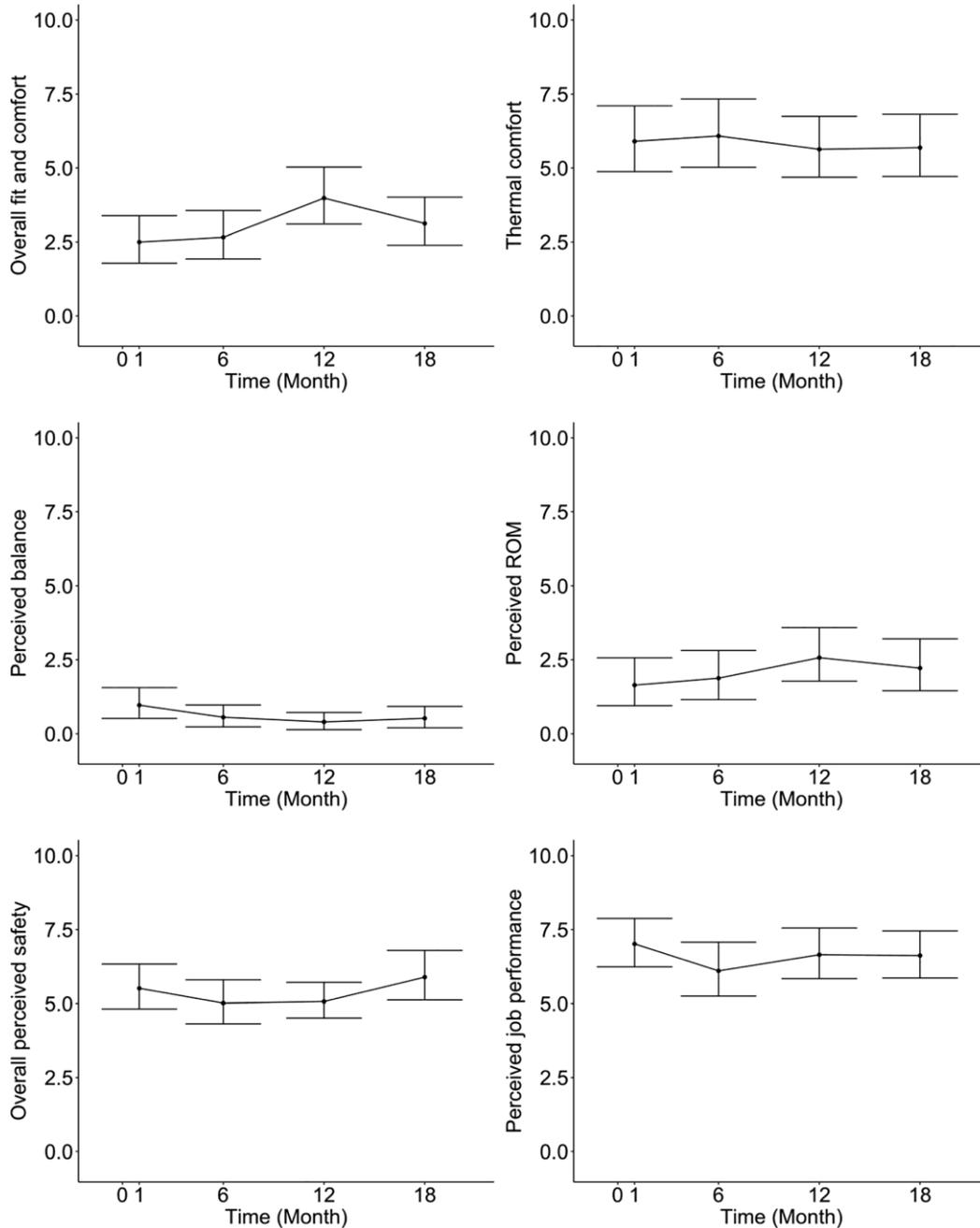


FIGURA 2. Risposte longitudinali alle domande relative all'usabilità riguardanti l'uso dell'ASE. Per domande su comfort e vestibilità complessivi, comfort termico, equilibrio percepito e range di movimento percepito (ROM), le risposte andavano da 0 a 10 e un valore più alto è peggiore. Per le domande sulla sicurezza percepita in generale e sulla prestazione lavorativa percepita, le risposte variavano da 0 a 10, con 0 = sostanzialmente meno sicuro (o peggiore), 5 = nessuna differenza e 10 = sostanzialmente più sicuro (o migliore). Le barre di errore indicano intervalli di confidenza al 95%. ASE, esoscheletro di supporto del braccio.

JOEM # Volume XX, Number X, Month 2021
Health Outcome

Long-term Exoskeleton Usability and

TABELLA 1

Le cinque categorie più frequenti dei commenti ottenuti da ciascuna domanda relativa all'uso

	Le cinque categorie più frequenti	Esempi di commenti
Vestibilità e comfort complessivi (n = 109)	<p>Polsino da braccio (25.7%)</p> <p>Caldo (18.3%)</p> <p>Sfregamento/scavo nel corpo (11.9%)</p> <p>Cintura (11.9%)</p> <p>Sensazione di rigidità (8.3%)</p>	<p>Sfregamenti sulla parte superiore del braccio dentro/dal polsino Molto caldo durante i mesi estivi</p> <p>L'ASE sfrega la schiena e/o le spalle. È necessaria più imbottitura nella cintura in vita</p> <p>Sembra rigido/rigido: non riesce a ruotare il tronco o ad estendere completamente la schiena</p>
Equilibrio percepito (n = 14)	<p>Percentuale contabilizzata per = 83.5%</p> <p>Piegarsi in avanti (71.5%)</p> <p>Torsione del tronco (14.3%)</p> <p>Equilibrio mediolaterale (7.1%)</p> <p>Accovacciarsi (7.1%)</p> <p>Percentuale contabilizzata per = 100%</p>	<p>Necessità di essere più consapevoli dell'ambiente circostante</p> <p>Piegarsi in avanti o rialzarsi</p> <p>Girarsi rapidamente o ruotare per afferrare una parte</p> <p>Sentirsi sbilanciati lateralmente</p> <p>Accovacciarsi su una superficie inclinata</p>
ROM percepita (n = 83) (38.5%)	<p>Allungamento</p> <p>Piegatura del tronco (37.4%)</p> <p>Torsione del tronco (14.5%)</p> <p>Accovacciarsi (4.8%)</p> <p>Movimento del braccio (2.4%)</p> <p>Allungamento (2.4%)</p> <p>Percentuale contabilizzata per = 100%</p>	<p>Allungarsi in avanti, all'indietro o attraverso il corpo</p> <p>Piegarsi in avanti per avvicinare/a terra le parti</p> <p>Ruotare il tronco (sentirsi rigido)</p> <p>Leggera necessità di regolare i movimenti del braccio durante l'esecuzione del lavoro</p>
Sicurezza complessiva percepita (n = 46)	<p>Pericoli di intralcio (34.8%)</p> <p>Hai meno probabilità di avere un infortunio alla spalla (15.2%)</p> <p>Meno sforzo sulle spalle (e sulla schiena) (13.1%)</p> <p>ingombro (11.0%)</p> <p>Aiuta con la postura (11.0%)</p> <p>Meno probabilità di far cadere materiali grazie all'assistenza della spalla (6.5%)</p> <p>Percentuale contabilizzata per = 91.6%</p>	<p>Assistenza sul braccio (19.5%)</p> <p>Meno sforzo sulla spalla (e sul collo) (12.6%)</p> <p>Impossibile muoversi rapidamente (5.8%)</p> <p>Percentuale contabilizzata per = 80.4%</p>
Prestazione lavorativa percepita (n = 87)	<p>Meno dolore alla spalla (e al braccio/collo) (21.8%)</p> <p>Meno Fatica (20.7%)</p>	

Temi che l'ASE possa impigliarsi nei veicoli o nel gancio di una pistola. Meno probabilità di avere	lesioni alla spalla Meno affaticamento, dolori o dolori alle spalle e/o alla schiena. Sensazione di tensione nell'area di lavoro Migliorare/correggere le posture Può durare più a lungo e impiegare meno sforzi per	svolgere la stessa quantità di lavoro L'assistenza extra sul braccio elimina dolori e dolori. È più facile inserire gli scudi in posizione Meno dolore alle spalle e al collo e meno stanchezza Senti che ci vuole più tempo per completare un ciclo e che i movimenti sono rallentati
--	---	--

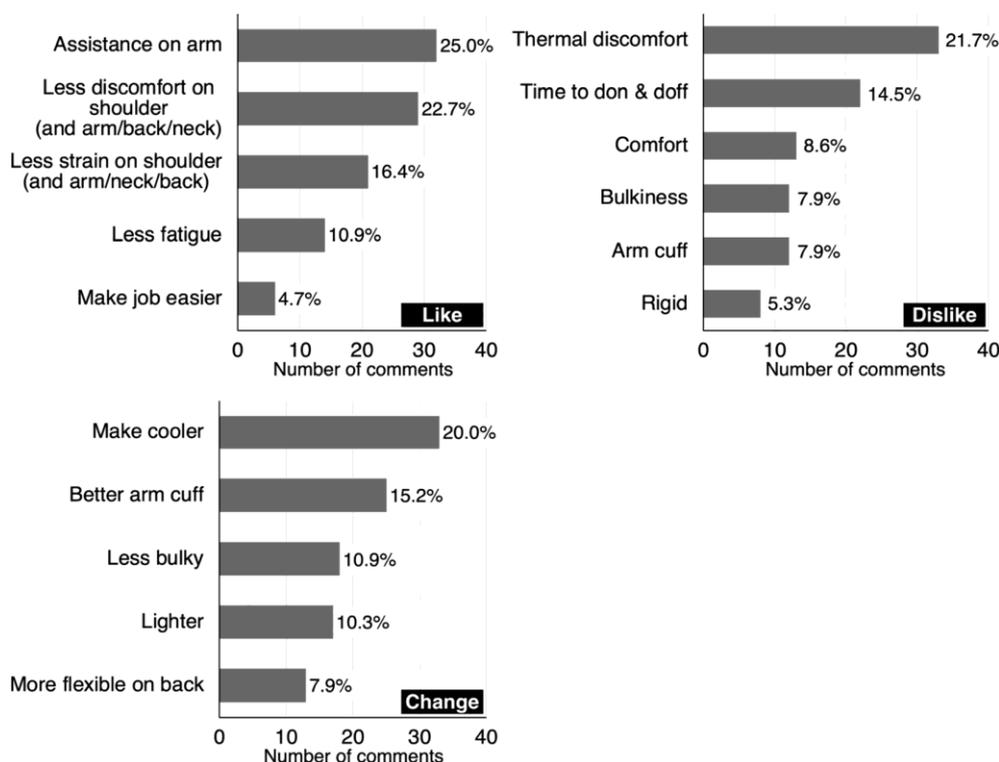
I nella tabella, n è il numero totale di commenti, le percentuali rappresentano la frequenza relativa dei commenti in ciascuna categoria e la percentuale rappresentata è la percentuale totale rappresentata dalle cinque categorie più frequenti.

Efficacia di un ASE nel ridurre le richieste fisiche sulla spalla e su altre parti del corpo

Gli studi esistenti in laboratorio e sul campo hanno dimostrato che l'uso di un ASE può ridurre l'attività muscolare nella regione della spalla, i costi metabolici e/o l'affaticamento durante il lavoro sopra la testa,^{10,14,40} sebbene l'entità di tali benefici sembri essere relativamente minore in studi sul campo rispetto a quelli in laboratorio.^{16,19} Abbiamo anche riferito in precedenza che c'erano punteggi di disagio muscoloscheletrico solo leggermente inferiori riportati per il collo e la spalla in un gruppo che utilizzava un ASE (rispetto a nessun ASE) durante il lavoro di assemblaggio automobilistico.²¹ I risultati attuali concordano con quei rapporti precedenti, in quanto gli attuali partecipanti hanno riportato la stessa o leggermente migliore sicurezza percepita e prestazioni lavorative utilizzando un ASE (Fig. 2). I commenti dei partecipanti hanno indicato che, con l'assistenza dell'ASE, si sentivano meno propensi a subire un infortunio, avevano meno sforzo e/o dolore alla spalla e potevano lavorare più a lungo con meno sforzo.

Infatti, l'assistenza dell'ASE e i relativi benefici sono stati gli aspetti dell'ASE che più sono piaciuti (Fig. 3), a sostegno del fatto che gli utenti (cioè i veri addetti al montaggio) hanno percepito benefici in termini di riduzione dello sforzo e dell'affaticamento della spalla durante il loro lavoro quotidiano. Inoltre, i risultati attuali supportano il fatto

che l'uso dell'ASE può avere effetti benefici su altre regioni del corpo, come il collo e la schiena. Meno sforzo/dolore al braccio, alla schiena e/o al collo è stato un aspetto apprezzato dai partecipanti nell'utilizzo dell'ASE (Fig. 3). Smets¹⁵ ha riportato un risultato simile, ovvero che c'era meno disagio legato al lavoro su spalle, braccia, collo e schiena dopo un uso regolare dello stesso ASE qui esaminato. Mentre una riduzione della tensione/dolore percepito sul collo può essere attribuita al cuscino per il collo incluso con l'ASE, Hefferle et al.¹⁸ hanno esaminato due ASE senza cuscino per il collo e hanno riscontrato una riduzione significativa della tensione percepita sul collo durante il lavoro automobilistico. Uno studio di meta-analisi di Baer et al⁹ ha dimostrato che l'uso di un ASE riduce significativamente le richieste fisiche (ad esempio, lo sforzo percepito) nella muscolatura che circonda e/o attraversa l'articolazione della spalla (ad esempio, collo, parte superiore delle braccia, spalla). La loro meta-analisi non ha rilevato una riduzione significativa della tensione percepita sulla schiena, tuttavia diversi studi hanno riportato riduzioni dell'attività degli estensori posteriori e/o della tensione percepita con l'uso dell'ASE.^{15,16,18,41} Kim et al.⁴¹ hanno discusso il potenziale supporto posturale fornito dalla struttura rigida di un ASE, che potrebbe aiutare a mantenere posture più neutre del tronco durante il lavoro. In effetti, i partecipanti attuali hanno commentato che l'ASE li ha aiutati con le loro posture, anche se un cambiamento comune che i partecipanti desideravano era essere più flessibili sulla schiena.



Kim et al
Month 2021

JOEM # Volume XX, Number X,

FIGURA 3. Cinque le categorie più frequenti di commenti ottenuti in risposta alle seguenti domande: "Cosa ti piace di più dell'esoscheletro?" (Mi piace); "Cosa ti piace meno dell'esoscheletro?" (Non mi piace); e "Se potessi cambiare qualcosa riguardo all'esoscheletro, cosa cambieresti?" (Cambiamento). I valori percentuali rappresentano le frequenze relative dei commenti per ciascuna categoria.

Preoccupazioni sulla progettazione ASE e sull'interfaccia fisica

I risultati di diversi studi precedenti indicano che il comfort fisico quando si indossa un esoscheletro è un fattore chiave che influenza l'accettazione da parte dell'utente e l'intenzione di utilizzarlo.^{24,26,42} La vestibilità e il comfort sono importanti affinché l'esoscheletro funzioni correttamente e affinché l'utente lo utilizzi comodamente per una lunga durata. Nel presente studio, i commenti dei partecipanti sulla vestibilità e sul comfort complessivi hanno evidenziato preoccupazioni specifiche riguardanti il polsino, la cintura in vita e il pannello/piastra in rete posteriore (Tabella 1; Fig. 1). I primi due sono interfacce fisiche che trasmettono/distribuiscono le forze esterne dall'ASE alla parte del corpo corrispondente. I problemi di idoneità sembravano aver causato punti caldi di disagio dovuti a sfregamenti, sfregamenti e ad alta pressione localizzata. La struttura posteriore dell'ASE era rigidamente collegata alla cintura in vita, quindi il pannello posteriore in rete non seguiva da vicino il movimento del tronco dell'utente. Sembra che

questa limitazione abbia causato sfregamenti/scavi sulla schiena dell'utente a causa dei movimenti relativi tra il tronco dell'utente e il pannello in rete posteriore. La struttura rigida della schiena era una delle ragioni principali per cui i partecipanti si sentivano rigidi durante il movimento, sebbene i partecipanti abbiano anche commentato favorevolmente la correzione ed il supporto posturale fornito da questa struttura.

I partecipanti hanno inoltre espresso preoccupazioni circa l'ingombro aggiuntivo dovuto ai componenti dell'ASE (ad esempio, le articolazioni sporgenti delle spalle dell'ASE) e il peso del dispositivo (nota: la massa unitaria dell'ASE testata era di 4,3 kg). L'ingombro, in particolare, sembrava una delle principali fonti di problemi di sicurezza, come il rischio di intoppi. Va notato che diversi ASE utilizzano approcci di progettazione diversi, che coinvolgono "impronte" relativamente più grandi o piccole e che l'EksoVest testato qui è stato da allora interrotto e sostituito con una nuova versione che ha un design più minimale (ad esempio, l'articolazione della spalla meccanismo è stato riprogettato per avere un ingombro fisico minore).

TABELLA 2. Risultati della regressione logistica degli effetti di diversi fattori sull'intenzione di utilizzare l'esoscheletro di supporto del braccio

	b	Odds Ratio	95% CI	P
Intercettare	-0.93	0.39	-7.78, 5.98	0.78
Vestibilità e comfort complessivi	-0.19	0.83	-1.09, 0.66	0.65
Comfort termico	-0.08	0.92	-0.73, 0.52	0.79
Percezione ROM	-0.16	0.85	-0.88, 0.46	0.61
Sicurezza complessiva percepita	-0.62	0.54	-1.92, 0.26	0.24
Prestazione lavorativa percepita	1.02	2.79	0.32, 2.16	0.02

ASE, esoscheletro di supporto del braccio; CI, intervallo di confidenza; ROM, raggio di movimento.

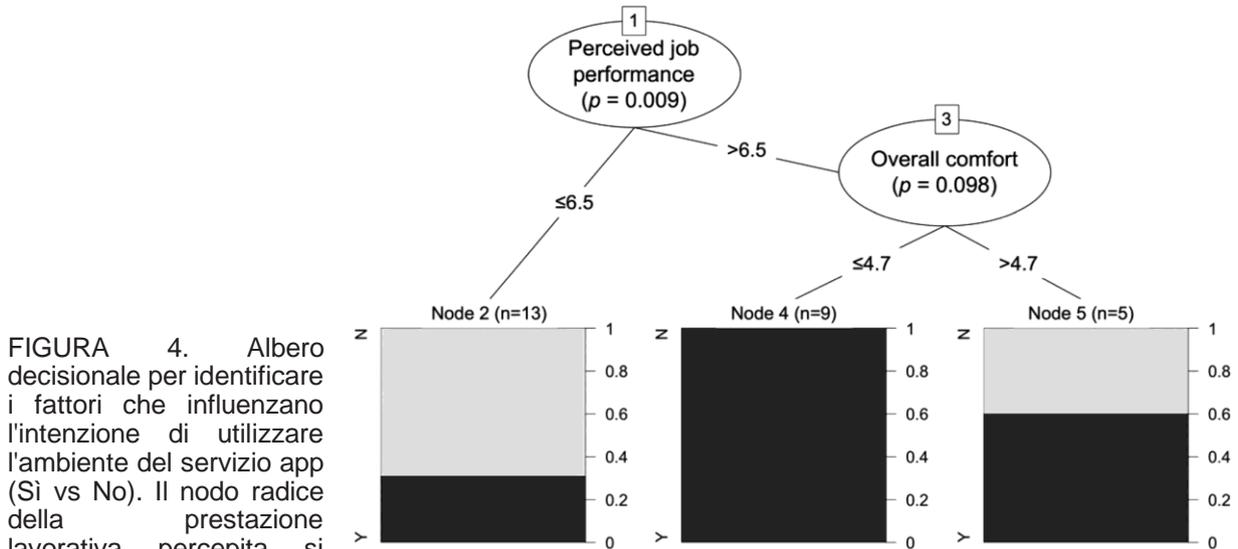


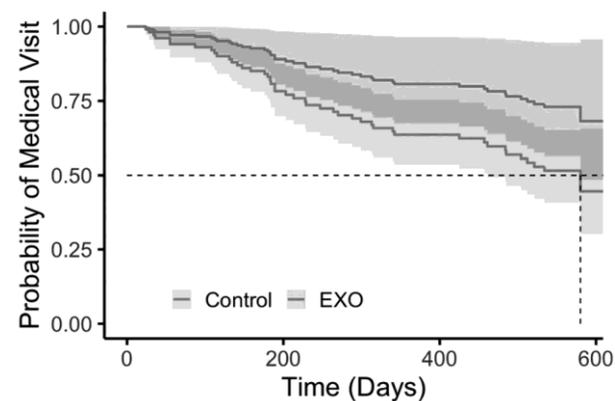
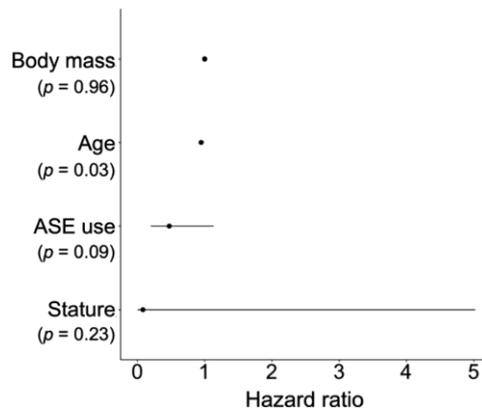
FIGURA 4. Albero decisionale per identificare i fattori che influenzano l'intenzione di utilizzare l'ambiente del servizio app (Sì vs No). Il nodo radice della prestazione lavorativa percepita si estende fino ai nodi foglia (terminali). I nodi foglia mostrano la proporzione delle risposte Sì (Y) e No (N). ASE, esoscheletro di supporto del braccio.

Per comprendere il comfort, diversi studi hanno quantificato le forze/pressioni di interazione sull'interfaccia utente-esoscheletro o valutato le pressioni di contatto con diversi design o materiali dell'interfaccia fisica.⁴³⁻⁴⁷ Levesque et al,⁴³ in particolare, hanno offerto diversi design dell'interfaccia raccomandazioni, tra cui un bracciale in grado di accogliere un'ampia variabilità inter e intra-soggetto nella forma e nelle dimensioni degli arti, nonché cambiamenti dovuti alla contrazione muscolare, e che possa inclinarsi per mantenere un ampio contatto

indipendentemente dai movimenti del segmento corporeo. Kozinc et al.⁴⁵ hanno riferito che la tolleranza alla pressione è molto variabile tra gli individui e inferiore per le donne.

Inoltre, a conoscenza degli autori, esiste una

comprensione limitata della relazione tra comfort e rapporti di pressione quando si utilizzano tecnologie dell'esoscheletro per periodi relativamente lunghi. L'ampia variabilità interindividuale nelle forme/dimensioni degli arti e nelle soglie di pressione, e la mancanza di relazioni comfort-



pressione, suggeriscono che è difficile progettare interfacce fisiche confortevoli per un esoscheletro, e sono quindi raccomandate ulteriori ricerche.

Intenzione di utilizzo ASE

La prestazione lavorativa percepita sembrava

essere un fattore determinante dell'intenzione di utilizzo dell'ASE (Tabella 2); come notato in precedenza, un aumento unitario della prestazione lavorativa percepita (più alto è meglio) aumenta significativamente le probabilità di utilizzare l'ASE del 179%. L'adattamento e il comfort complessivi sono stati un altro importante fattore determinante dell'intenzione all'uso, basato sull'albero decisionale (Fig. 4). La prestazione

lavorativa percepita può essere considerata come un indicatore dell'utilità percepita nel Modello di accettazione della tecnologia (TAM)⁴⁸ o dell'aspettativa di prestazione nella Teoria unificata dell'accettazione e dell'uso della tecnologia (UTAUT).⁴⁹ I nostri risultati sono coerenti con lavori precedenti che hanno mostrato l'utilità e/o il comfort percepiti sono determinanti chiave dell'intenzione di utilizzo dell'esoscheletro.^{24-26,50}

FIGURA 5. A sinistra: rapporti di rischio associati a ciascun coefficiente nel modello di regressione dei rischi proporzionali di Cox (a sinistra); le barre di errore indicano intervalli di confidenza al 95%. A destra: curve di sopravvivenza che mostrano la differenza nella probabilità di una visita medica a causa di un infortunio e/o dolore all'arto superiore (dita escluse) o alla schiena.

! 2021 American College of Occupational and Environmental Medicine

Kim et al
Month 2021

JOEM # Volume XX, Number X,

È interessante notare, tuttavia, che la risposta più comune alla domanda "Se potessi cambiare qualcosa riguardo all'esoscheletro, cosa cambieresti?" era legata al disagio termico (Fig. 3). In un contesto simile di assemblaggio automobilistico, Smets¹⁵ ha osservato che il comfort termico era una delle ragioni principali per non indossare un ASE. Tuttavia, il comfort termico non è stato selezionato qui come un fattore determinante né da una regressione logistica né da un'analisi dell'albero decisionale. Questo risultato potrebbe essersi verificato perché i partecipanti consideravano il comfort termico come parte della vestibilità e del comfort generale, tanto che il secondo commento più comune era "Caldo" (Tabella 1). Dato che i partecipanti generalmente hanno sperimentato livelli di disagio termico da moderati ad elevati (Fig. 2), le risposte alla domanda sul comfort termico potrebbero non aver avuto un potere discriminante statistico sufficiente per prevedere l'intenzione di utilizzo. I nostri risultati suggeriscono che la vestibilità e il comfort complessivi non dovrebbero limitarsi alle sole interfacce fisiche e al design dell'esoscheletro, ma dovrebbero invece includere anche il comfort termico.

Pertanto, per facilitare l'adozione e l'uso dell'ASE in contesti lavorativi, gli effetti dell'uso dell'ASE sulle prestazioni percepite, sull'utilità e sul comfort sono probabilmente aspetti critici da

considerare. Questi aspetti possono essere visti come associati a fattori percettivi (facilità d'uso percepita e utilità percepita) nel dominio endogeno all'interno dell'Exosystem Use Intent Model (EUI) proposto recentemente da Purcell.⁵¹ L'IUE ha due ampi domini: esogeno (originario esterno all'utente) ed endogeno (interno all'utente) – ed è una modifica del Theoretical Interesting Model (TIM)⁵² sviluppato sulla base di TAM e UTAUT. Nell'IUE, i fattori esogeni del TIM sono stati modificati per riflettere solo gli aspetti fisici e ambientali di un sistema uomo-macchina sul posto di lavoro e i fattori includono individuo (cioè autoefficacia), sociale (cioè psicosociale) e contesti del compito (cioè compatibilità con il compito). L'IUE presuppone che i fattori esogeni possano moderare qualsiasi fattore comportamentale, percettivo e affettivo. Questo presupposto suggerisce che le prestazioni percepite, l'utilità e il comfort di un ASE dovrebbero essere esaminati considerando anche i fattori esogeni. Nel presente studio, alcuni partecipanti hanno menzionato una preoccupazione sociale, come l'attenzione desiderata o indesiderata da parte dei colleghi. Preoccupazioni per la sicurezza, come i rischi di intoppi, suggeriscono che, nonostante un'analisi rigorosa della sicurezza prima dell'implementazione nelle postazioni di lavoro candidate, l'ingombro dell'ASE è rimasto un problema per alcuni utenti, il che implica che l'ASE esaminato non era sufficientemente

compatibile con lo spazio di lavoro. Sono necessarie ulteriori ricerche per comprendere meglio come e in che misura i fattori esogeni influenzano l'intenzione d'uso per un dato ASE e un lavoro specifico.

L'uso di un ASE può ridurre il rischio di problemi muscoloscheletrici?

Nella letteratura attuale, l'utilizzo di un ASE è spesso considerato un intervento promettente per ridurre gli infortuni alla spalla legati al lavoro, dato che l'uso dell'ASE può ridurre lo sforzo fisico e l'affaticamento della muscolatura della spalla. Tuttavia, è ancora una questione aperta se l'uso di un ASE (o di qualsiasi esoscheletro) possa o porterà a una riduzione del rischio di lesioni e, a nostra conoscenza, nessuno studio formale ha riportato una riduzione delle lesioni con l'uso dell'esoscheletro.^{53,54} Abbiamo scoperto che coloro che hanno utilizzato l'ASE avevano circa la metà delle probabilità di sottoporsi a una visita medica (Fig. 5) che comportava lesioni o dolore all'estremità superiore (dita escluse) o alla schiena. Consideriamo questo un risultato promettente e suggestivo, anche se suggeriamo anche cautela nell'interpretarlo dato l'elevato numero di abbandoni e la dimensione moderata del campione. Sottolineiamo, tuttavia, che a questo risultato promettente può essere attribuito parzialmente un luogo di controllo di sicurezza più elevato con l'uso dell'ASE, dato che tale controllo può essere un predittore di incidenti e infortuni sul lavoro.^{55,56} Un sottogruppo di lavoratori ha utilizzato l'ASE in ogni struttura, che potrebbero aver influenzato i loro comportamenti. Ad esempio, una maggiore attenzione da parte di colleghi e supervisori potrebbe aver reso alcuni partecipanti meno disposti a sottoporsi a una visita medica. Più in generale, potrebbe essere stato presente un effetto Hawthorne.⁵⁷ Pertanto, sarà necessario lavoro futuro per fornire prove, con una dimensione del campione più ampia, una durata di utilizzo più lunga e il monitoraggio dell'uso dell'esoscheletro. Si raccomanda inoltre l'inclusione di ulteriori predittori (ad esempio, riduzioni dell'attività muscolare o dei costi metabolici, cambiamenti nelle posture o nei movimenti).

Limitazioni

L'attuale studio presenta diversi punti di forza, dato l'uso di una progettazione longitudinale e la raccolta di dati in situ da parte di addetti all'assemblaggio reali. Tuttavia, è opportuno riconoscere alcune importanti limitazioni. Innanzitutto, mancavano dei dati. Per

affrontare le risposte mancanti è stata utilizzata l'imputazione multipla, che non presuppone alcun modello sistematico di mancanza. Abbiamo considerato questa ipotesi ragionevole, in quanto le risposte mancanti probabilmente dipendevano dalle circostanze dei singoli partecipanti (ad esempio, cambiamenti nel turno di lavoro, ferie). In secondo luogo, i fattori psicosociali non sono stati formalmente considerati. Alcuni partecipanti hanno notato, tuttavia, che gli piaceva o non piaceva l'attenzione che ricevevano dai colleghi quando utilizzavano l'ASE. Si raccomanda di includere gli aspetti psicosociali negli sforzi futuri, poiché elevate richieste psicosociali sono un fattore di rischio per disturbi muscolo-scheletrici e infortuni legati al lavoro.^{58,59} In terzo luogo, i dati non sono stati ottenuti prima della tappa fondamentale del mese 1. Sebbene le risposte riguardanti l'usabilità siano rimaste stabili per un periodo di 18 mesi, non è chiaro quanto velocemente i partecipanti abbiano stabilito tali percezioni. In quarto luogo, le domande del questionario non sono state validate in modo esaustivo, quindi è necessario prestare attenzione nell'interpretazione dei risultati. In quinto luogo, non disponevamo di dati sufficienti sull'effettivo utilizzo dell'ASE durante il periodo di studio. Sebbene sia stato tentato di ottenere tali dati, i risultati erano troppo scarsi per essere utili e i modelli di utilizzo dell'ASE sembravano variare sostanzialmente tra i partecipanti. Alcuni partecipanti hanno utilizzato l'ASE raramente (ad esempio, 1-2 ore al giorno per 1 o 2 giorni alla settimana, durante le giornate fresche), mentre alcuni lo hanno utilizzato fino a 4-10 ore al giorno per 4 o 5 giorni alla settimana. I futuri studi sul campo trarrebbero chiaramente vantaggio dall'inclusione di periodi di utilizzo per quantificare meglio sia i benefici che i limiti degli esoscheletri. Sesto, la randomizzazione non è stata utilizzata nella selezione dei partecipanti o delle strutture partecipanti, né i partecipanti sono stati randomizzati nei gruppi ASE rispetto a quelli di controllo. Entrambe le limitazioni progettuali derivavano da inevitabili limitazioni pratiche. Da notare, tuttavia, che le caratteristiche demografiche e le richieste di compiti erano generalmente comparabili tra i due gruppi²¹ e la struttura è stata inclusa nelle analisi statistiche. Nonostante la mancanza di randomizzazione, riteniamo che i risultati attuali consentano ancora di valutare in una certa misura i fattori confondenti, i gruppi eterogenei e i bias di selezione.

CONCLUSIONI

I risultati di una prova sul campo di 18 mesi di

un ASE nell'assemblaggio automobilistico hanno mostrato che, come previsto dalla progettazione dell'esoscheletro, gli utenti hanno percepito meno sforzo e affaticamento nelle spalle e hanno sperimentato effetti positivi sulle prestazioni lavorative, senza grossi problemi di sicurezza. Tuttavia, c'erano preoccupazioni più considerevoli sull'adattamento e sul comfort dell'ASE legati al design dell'esoscheletro e all'interfaccia fisica. Il comfort termico sembrava essere un aspetto percettivo importante. Inoltre, i nostri risultati hanno confermato che la prestazione lavorativa percepita (vale a dire, l'utilità percepita) e l'idoneità e il comfort generale sono fattori chiave nel determinare l'intenzione di utilizzare un ASE e abbiamo ottenuto un'indicazione preliminare che l'uso di ASE potrebbe ridurre il rischio di UE- DMS. Per supportare l'adozione e l'uso sicuri ed efficaci degli ASE sul campo, il lavoro futuro dovrebbe studiare approcci per: (1) consentire la

progettazione di interfacce fisiche più confortevoli, (2) migliorare la nostra comprensione dell'intenzione d'uso dell'esoscheletro includendo fattori aggiuntivi (ad esempio, esigenze fisiche, aspetti comportamentali e psicosociali e vincoli dello spazio di lavoro), (3) indagare sui cambiamenti temporali nelle percezioni sull'usabilità dell'esoscheletro e utilizzare le opinioni per un periodo di 1 mese per valutare la rapidità con cui gli utenti stabiliscono percezioni e opinioni allo stato stazionario e (4) eseguire un'indagine più rigorosa sui risultati sulla salute derivanti dall'uso dell'esoscheletro a lungo termine.

RICONOSCIMENTI

Gli autori ringraziano Brad Sochacki della Ford Motor Company per l'aiuto nella raccolta e organizzazione dei dati, e il Comitato congiunto nazionale per la salute e la sicurezza UAW-Ford per il supporto nella pianificazione e nel completamento di questo studio.

RIFERIMENTI

1. U.S. Bureau of Labor Statistics. TABLE R2. Number of nonfatal occupational injuries and illnesses involving days away from work by industry and selected parts of body affected by injury or illness, private industry, 2019 [Internet]. Injuries, Illnesses, and Fatalities; 2020. Available at: https://www.bls.gov/iif/oshwc/osh/case/cd_r2_2019.htm. Accessed June 4, 2021.
2. Dunning KK, Davis KG, Cook C, et al. Costs by industry and diagnosis among musculoskeletal claims in a state workers compensation system: 1999–2004. *Am J Ind Med.* 2010;53:276–284.
3. Punnett L. The costs of work-related musculoskeletal disorders in automotive manufacturing. *New Solut.* 1999;9:403–426.
4. Roquelaure Y, Ha C, Rouillon C, et al. Risk factors for upper-extremity musculoskeletal disorders in the working population. *Arthritis Rheum.* 2009;61:1425–1434.
5. Punnett L, Gold J, Katz JN, Gore R, Wegman DH. Ergonomic stressors and upper extremity musculoskeletal disorders in automobile manufacturing: a one year follow up study. *Occup Environ Med.* 2004;61:668–674.
6. Malchaire J, Cock N, Vergracht S. Review of the factors associated with musculoskeletal problems in epidemiological studies. *Int Arch Occup Environ Health.* 2001;74:79–90.
7. Lowe BD, Billotte WG, Peterson DR. ASTM F48 formation and standards for industrial exoskeletons and exosuits. *IISE Trans Occup Ergon Hum Factors.* 2019;7:230–236.
8. McFarland T, Fischer S. Considerations for industrial use: a systematic review of the impact of active and passive upper limb exoskeletons on physical exposures. *IISE Trans Occup Ergon Hum Fact.* 2019;7:322–347.

9. Ba"r M, Steinhilber B, Rieger MA, Luger T. The influence of using exo- skeletons during occupational tasks on acute physical stress and strain compared to no exoskeleton—a systematic review and meta-analysis. *Appl Ergon*. 2021;94:103385.
10. Kim S, Nussbaum MA, Esfahani MIM, Alemi MM, Alabdulkarim S, Rashedi E. Assessing the influence of a passive, upper extremity exoskeletal vest for tasks requiring arm elevation: part I—"Expected" effects on discomfort, shoulder muscle activity, and work task performance. *Appl Ergon*. 2018;70:315–322.
11. Huysamen K, Bosch T, de Looze M, Stadler KS, Graf E, O'Sullivan LW. Evaluation of a passive exoskeleton for static upper limb activities. *Appl Ergon*. 2018;70:148–155.
12. de Vries AW, Krause F, de Looze MP. The effectivity of a passive arm support exoskeleton in reducing muscle activation and perceived exertion during plastering activities. *Ergonomics*. 2021;64:712–721.
13. Pinho JP, Taira C, Parik-Americano P, et al. A comparison between three commercially available exoskeletons in the automotive industry: an electromyographic pilot study. In: 2020 8th, IEEE., RAS/EMBS., International Conference for Biomedical Robotics, Biomechatronics, (BioRob)., ieeex- plore., ieee., org; 2020: 246–251.
14. Maurice P, Camernik J, Gorjan D, et al. Objective and subjective effects of a passive exoskeleton on overhead work. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*. 2019;28:152–164.
15. Smets M. A field evaluation of arm-support exoskeletons for overhead work applications in automotive assembly. *IISE Trans Occup Ergon Hum Fact*. 2019;7:192–198.
16. Gillette JC, Stephenson ML. Electromyographic assessment of a shoulder support exoskeleton during on-site job tasks. *IISE Trans Occup Ergon Hum Fact*. 2019;7:302–310.
17. Spada S, Ghibaudo L, Gilotta S, Gastaldi L, Cavatorta MP. Analysis of exoskeleton introduction in industrial reality: main issues and eaws risk assessment. In: *Advances in Physical Ergonomics and Human Factors*. Springer International Publishing; 2018: 236–244.
- Hefferle M, Snell M, Kluth K. Influence of two industrial overhead exo- skeletons on perceived strain - a field study in the automotive industry. In: *Advances in Human Factors in Robots, Drones and Unmanned Systems*. Springer International Publishing; 2021. p. 94–100.
18. De Bock S, Ghillebert J, Govaerts R, et al. Passive shoulder exoskeletons: more effective in the lab than in the field? *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*. 2021;29:173–183.
19. Marino M. Impacts of using passive back assist and shoulder assist exo- skeletons in a wholesale and retail trade sector environment. *IISE Trans Occup Ergon Hum Fact*. 2019;7:281–290.
20. Kim S, Nussbaum MA, Smets M, Ranganathan S. Effects of an arm-support exoskeleton on perceived work intensity and musculoskeletal discomfort: an 18-month field study in automotive assembly. *Am J Ind Med*. 2021;64:905–914.
21. Kim S, Nussbaum MA. A follow-up study of the effects of an arm support exoskeleton on physical demands and task performance during simulated overhead work. *IISE Trans Occup Ergon Hum Fact*. 2019;7:163–174.
22. Amandels S, Eyndt HOH, Daenen L, Hermans V. 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)*. Springer International Publishing; 2019: 387–392.
23. Hensel R, Keil M. Subjective evaluation of a passive industrial exoskeleton for lower-back support: a field study in the automotive sector. *IISE Trans Occup Ergon Hum Fact*. 2019;7:213–221.
24. Siedl SM, Wolf M, Mara M. Exoskeletons in the supermarket: influences of comfort, strain relief and task-technology fit on retail workers' post-trial intention to use. In: *Companion of the 2021 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery; 2021: 397–401. (HRI '21 Companion).
25. Moyon A, Poirson E, Petiot J-F. Development of an acceptance model for occupational exoskeletons and application for a passive upper limb device. *IISE Trans Occup Ergon Hum Fact*. 2019;7:291–301.
26. Ford Media Center. Called EksoVest, the wearable technology elevates and supports a worker's arms while performing overhead tasks [Internet]; 2017. Available at:

- <https://media.ford.com/content/fordmedia/fna/us/en/news/2017/11/09/ford-exoskeleton-technology-pilot.html>. Accessed July 1, 2021.
27. Baltrusch SJ, van Dieën JH, van Bennekom CAM, Houdijk H. The effect of a passive trunk exoskeleton on functional performance in healthy individuals. *Appl Ergon*. 2018;72:94–106.
 28. Brohl C, Nelles J, Brandl C, Mertens A, Schlick CM. TAM reloaded: a technology acceptance model for human-robot cooperation in production systems. In: Stephanidis C, ed. HCI International 2016 – Posters' Extended Abstracts. HCI 2016. Communications in Computer and Information Science. Cham: Springer; 2016.
 29. Bureau of Labor Statistics. TABLE R8. Incidence rates for nonfatal occupational injuries and illnesses involving days away from work per 10,000 full-time workers by industry and selected events or exposures leading to injury or illness, private industry, 2019 [Internet]; 2020. Available at: https://www.bls.gov/iif/oshwc/osh/case/cd_r8_2019.htm. Accessed June 4, 2021.
 30. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria; 2021. Available at: www.R-project.org/.
 31. Halekoh U, Højsgaard S, Yan J. The R package geepack for generalized estimating equations. *J Stat Softw*. 2006;15:1–11.
 32. Bartlett J. *bootImpute: Bootstrap Inference for Multiple Imputation*; 2021.
 33. Wu H, Leung S-O. Can Likert scales be treated as interval scales?—A simulation study. *J Soc Serv Res*. 2017;43:527–532.
 34. Silge J, Robinson D. Tidytext: Text mining and analysis using tidy data principles in R. *J Open Source Softw*. 2016;1:37.
 35. Hothorn T, Hornik K, Zeileis A. Unbiased recursive partitioning: a conditional inference framework. *J Comput Graph Stat*. 2006;15:651–674.
 36. Therneau TM, Grambsch PM. The Cox model. In: Therneau TM, Grambsch PM, editors. *Modeling Survival Data: Extending the Cox Model*. New York, NY: Springer New York; 2000. p. 39–77.
 37. Kelly PJ, Lim LL. Survival analysis for recurrent event data: an application to childhood infectious diseases. *Stat Med*. 2000;19:13–33.
 38. Abeysekera WWM, Sooriyarachchi MR. Use of Schoenfeld's global test to test the proportional hazards assumption in the Cox proportional hazards model: an application to a clinical study. *J Natl Sci Found*. 2009;37:41.
 39. Schmalz T, Schandlinger J, Schuler M, et al. Biomechanical and metabolic effectiveness of an industrial exoskeleton for overhead work. *Int J Environ Res Public Health*. 2019;16:4792.
 40. Kim S, Nussbaum MA, Mokhlespour Esfahani MI, Alemi MM, Jia B, Rashedi E. Assessing the influence of a passive, upper extremity exoskeletal vest for tasks requiring arm elevation: Part II – “Unexpected” effects on shoulder motion, balance, and spine loading. *Appl Ergon*. 2018;70:323–330.
 41. de Looze MP, Bosch T, Krause F, Stadler KS, O'Sullivan LW. Exoskeletons for industrial application and their potential effects on physical work load. *Ergonomics*. 2016;59:671–681.
 42. Levesque L, Pardoel S, Lovrenovic Z, Doumit M. Experimental comfort assessment of an active exoskeleton interface. In: 2017 IEEE International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors (IRIS); 2017: 38–43.
 43. De Rossi SMM, Vitiello N, Lenzi T, et al. Sensing pressure distribution on a lower-limb exoskeleton physical human-machine interface. *Sensors*. 2011;11:207–227.
 44. Kozinc Ž, Babič J, Šarabon N. Human pressure tolerance and effects of different padding materials with implications for development of exoskeletons and similar devices. *Appl Ergon*. 2021;93:103379.
 45. Langlois K, Roels E, Van De Velde G, et al. Integration of 3D printed flexible pressure sensors into physical interfaces for wearable robots. *Sensors (Basel)*. 2021;21:2255.
 46. Meyer JT, Schrade SO, Lambercy O, Gassert R. User-centered design and evaluation of physical interfaces for an exoskeleton for paraplegic users. *IEEE Int Conf Rehabil Robot*. 2019;2019:1159–1166.
 47. Davis FD. A Technology Acceptance Model for Empirically Testing New End-user Information Systems: Theory and Results [Ph.D.]. Cambridge, MA: MIT Sloan School of Management; 1985. Available at: <https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/15192/14927137-MIT.pdf>. Accessed June 8, 2021.
 48. Venkatesh V, Morris MG, Davis GB, Davis FD. User acceptance of information

- technology: toward a unified view. *Miss Q.* 2003;27:425–478.
49. Elprama SA, Vannieuwenhuyze JTA, De Bock S, et al. Social processes: what determines industrial workers' intention to use exoskeletons? *Hum Fact.* 2020;62:337–350.
50. Purcell K. *Measuring Exosystem Operator Use Intent: The Exosystem Use Intent Model - Industrial.* Army Public Health Center; 2020, Report No.: PHIP No. 55-07-1220.
51. Park SY. An analysis of the technology acceptance model in understanding university students' behavioral intention to use e-Learning. *J Educ Technol Soc.* 2009;12:150–162.
52. Howard J, Murashov VV, Lowe BD, Lu M-L. Industrial exoskeletons: need for intervention effectiveness research. *Am J Ind Med.* 2020; 63:201–208.
53. Nussbaum MA, Lowe BD, de Looze M, Harris-Adamson C, Smets M. An introduction to the special issue on occupational exoskeletons. *IISE Trans Occup Ergon Hum Fact.* 2019;7:153–162.
54. Wuebker LJ. Safety locus of control as a predictor of industrial accidents and injuries. *J Bus Psychol.* 1986;1:19–30.
55. Haas EJ, Yorio PL. The role of risk avoidance and locus of control in workers' near miss experiences: implications for improving safety management systems. *J Loss Prev Process Ind.* 2019;59:91–99.
56. Gillespie R. *Manufacturing Knowledge: A History of the Hawthorne Experiments.* Melbourne, Australia: Cambridge University Press; 1993. p. 282.
57. da Costa BR, Vieira ER. Risk factors for work-related musculoskeletal disorders: a systematic review of recent longitudinal studies. *Am J Ind Med.* 2010;53:285–323.
58. Baidwan NK, Gerberich SG, Kim H, Ryan A, Church T, Capistrant B. A longitudinal study of work-related psychosocial factors and injuries: Implications for the aging United States workforce. *Am J Ind Med.* 2019;62: 212–221.



Evomach

C.so Canale 18R
12051 Alba (CN)
ITALY

www.evomach.it
info@evomach.it
tel: 0141 1856187