





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

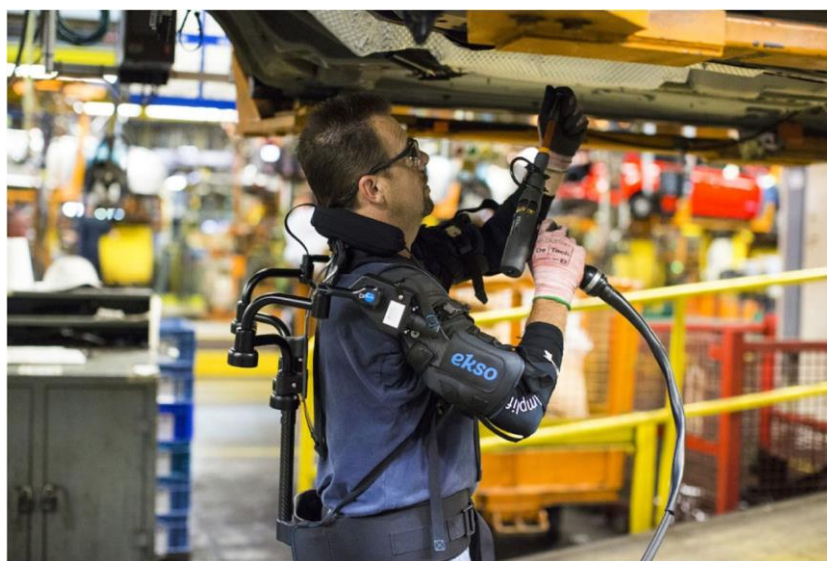


TABELLA 1

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

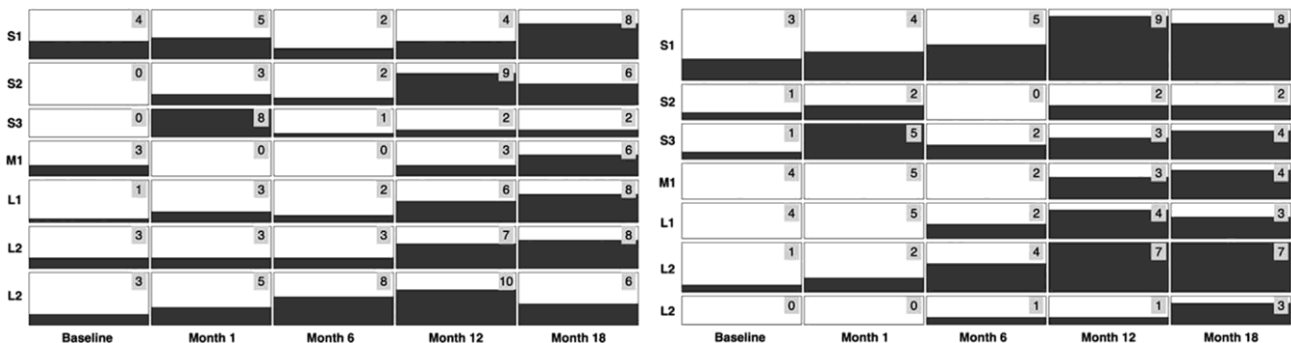


FIGURA 2 | Illustrazione dei dati mancanti in ciascuno degli impianti di produzione per il gruppo di controllo (a sinistra) e il gruppo EXO (a destra), in ciascuna delle tappe fondamentali della raccolta dati. I rettangoli mostrano le proporzioni dei dati mancanti (grigio scuro) e non mancanti (bianco), 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 ($\beta = -3,58$, $SE = 2,01$, $p = 0,076$).

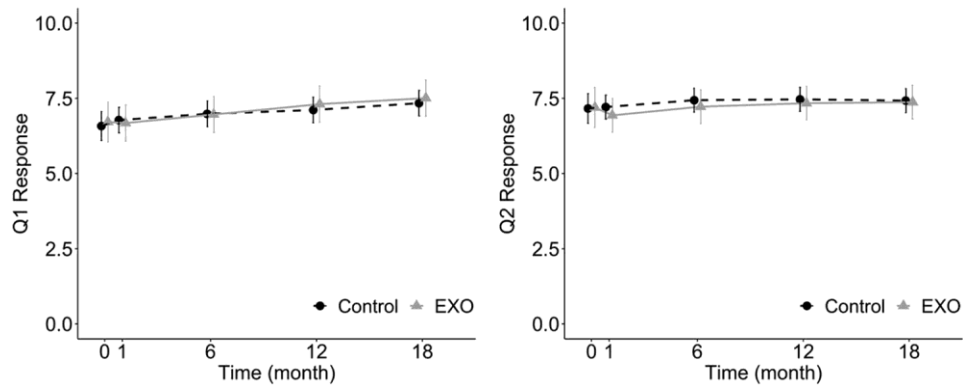


FIGURA 3 Risposte longitudinali alla domanda sull'intensità del lavoro Q1 ("Quando lavoro, mi sforzo davvero al massimo") e Q2 ("Mi sento esausto alla fine del turno") in ciascun gruppo sperimentale. I punti nei grafici sono valori mediani stimati da un mix utilizzando il set di dati imputati e le barre 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)

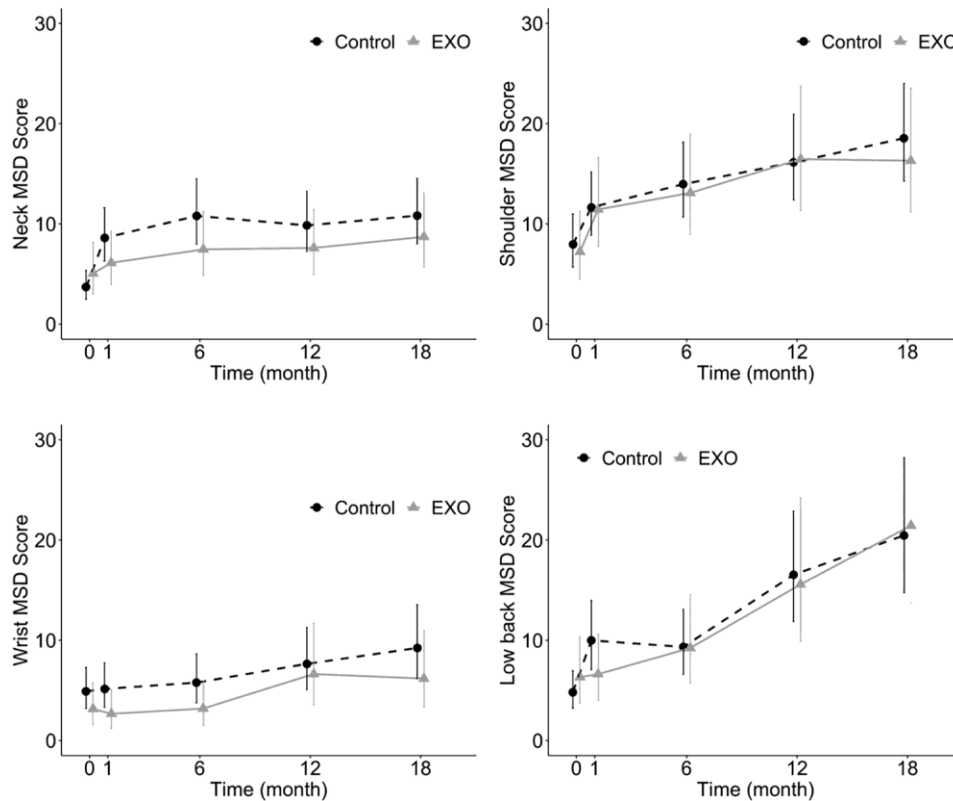


FIGURA 4 Punteggi MSD longitudinali del collo, della spalla, del polso e della parte bassa della schiena in ciascun gruppo sperimentale. I punti nella figura sono valori mediani stimati da modelli misti utilizzando il set di dati imputati e le barre di errore sono intervalli di confidenza al 95%. EXO,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