

*Dati Sperimentali in un Laboratorio di Ricerca Ergonomica  
Applicata alla Produzione nel Settore Automotive*

# Esoscheletro e Riduzione del Sovraccarico Biomeccanico per l'Arto Superiore

**Daniele Bonicatto<sup>1</sup>, Enrico Pira<sup>2</sup>, Stefania Spada<sup>3</sup>, Lidia Ghibauda<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Tecnico della prevenzione nell'Ambiente e nei Luoghi di Lavoro

<sup>2</sup> Università degli Studi di Torino – Dipartimento della Sanità Pubblica e Pediatriche – Medicina del Lavoro

<sup>3</sup> Fiat Chrysler Automobiles Italy SpA – Corso Settembrini 53 – Torino

Mail: daniele.bonicatto@gmail.com

## RIASSUNTO

Le malattie muscolo-scheletriche (MSD) sono tra le patologie prevalenti nel territorio Italiano (dati INAIL) e, pertanto i fattori di rischio ad esse correlati devono essere attentamente analizzati. Lo sviluppo scientifico e la tecnologia offrono sul mercato nuovi strumenti per contrastare questo fenomeno. La fase di analisi e sperimentazione di questi nuovi dispositivi o modelli procedurali è di fondamentale importanza per verificare l'accettabilità, l'usabilità e la reale efficacia nel contesto produttivo.

Lo studio di seguito riportato aveva come finalità quella di analizzare e di verificare la funzionalità e l'applicabilità di un prototipo di esoscheletro per arti superiori nel contesto automotive.

Lo studio è stato eseguito presso il laboratorio di ergonomia di FIAT CHRYSLER AUTOMOBILES - ErgoLab, con la finalità di definire l'applicabilità di un dispositivo di supporto, un esoscheletro passivo, in attività tipiche di una linea di produzione automotive.

La valutazione dell'introduzione di un esoscheletro per arti superiori ha l'ambizioso obiettivo di verificare la possibilità di ridurre il sovraccarico biomeccanico dei giunti dell'arto superiore in particolare del giunto della spalla.

Le fasi sperimentali del progetto si sono distinte in due momenti:

- la prima fase è consistita nell'esecuzione di attività slegate dalle tipiche attività di linea eseguite dagli operatori nel laboratorio di ergonomia;
- la seconda fase è consistita nella simulazione di attività simil-reali tipiche della linea di produzione ricreate in laboratorio.

## TAKE HOME MESSAGE

- *Le malattie muscoloscheletriche negli ultimi anni hanno avuto un'incidenza predominante nel contesto produttivo italiano. E' quindi importante valutare attentamente i fattori di rischio che possano portarne all'insorgenza e analizzare l'introduzione di dispositivi tecnologicamente all'avanguardia per ridurre il rischio da sovraccarico biomeccanico.*
- *Questo studio riporta la valutazione di un dispositivo di supporto per gli arti superiori durante le attività lavorative ricordando come innovazione, progresso e sperimentazione siano fondamentali per ampliare e far crescere il mondo della Prevenzione.*

Entrambe le tipologie di prova sono state eseguite dagli operatori prima, senza esoscheletro, e poi con l'aiuto dell'esoscheletro.

Dall'analisi dei dati raccolti durante le fasi sperimentali del progetto e dalle interviste ai lavoratori stessi, si è riscontrata l'efficacia dell'esoscheletro per determinate attività caratterizzate da particolari range of motion del giunto spalla; in seguito, è stato definito su quali particolari tipologie di lavorazioni risulta essere più idoneo e utile al suo scopo.

Punto cruciale in uno studio su tali dispositivi è l'influenza dell'uso dell'esoscheletro sugli item della valutazione del rischio da sovraccarico biomeccanico dell'arto superiore.

Dallo studio sono emersi diversi spunti di riflessione e di sviluppo futuri, sia per quanto riguarda la struttura dell'esoscheletro, sia sulle sue applicabilità in linea produttiva, ma anche in relazione ad alcuni limiti tecnologici che richiedono una rivalutazione tecnica di parti del dispositivo in ottica "cultura della sicurezza". Risulta poi fondamentale definire in quali settori produttivi un esoscheletro possa apportare il massimo beneficio.

## ABSTRACT

Musculoskeletal disorders are the most prevalent pathologies in Italy (reference to INAIL data) and the risk factors related are to be carefully analyzed. Nowadays, the technological development offers new tools commercially available to limit this phenomenon. The analysis, the experimental phase of these devices and the testing procedures are fundamental to verify acceptability, usability, and the real effectiveness in the productive context.

The study, mentioned in the paper, aimed to analyze and verify the effectiveness and applicability in the automotive environment of an exoskeleton prototype for upper limbs. The study has been carried out at the ergonomic laboratory of Fiat Chrysler Automobiles (FCA), ErgoLab, with the purpose to define the usability and acceptance of a passive exoskeleton by operators of automotive plants.

The assessment of upper limbs exoskeleton has the ambitious challenge of analyzing the possibility of reducing the biomechanical overload of shoulder joint.

The experimental phase of the project was divided into two moments:

- the first one consists in the execution of tasks, not related to typical working activities, performed by workers in the ErgoLab;
- the second one includes the simulation of semi-real working activities of the production line, recreated in the ErgoLab.

The tasks were performed by operators, before without and then wearing the exoskeleton.

Analysis of data, collected during the tests, and workers' interviews enlightened the exoskeleton effectiveness related to specific activities and range of motion; so after this analysis it was possible to define the tasks for which the exoskeleton is more suitable and useful.

Crucial point of this kind of studies is the exoskeleton influence on risk factors of upper limbs biomechanical overload risk assessment methods.

Several points of future development have been arise from the study relating to: the exoskeleton physical structure, the applicability of the device in the production line, but also in relation to some technological limitations that will require a technical re-evaluation of structural parts of the device taking into account the 'health and safety culture'.

The definition of productive sectors in which exoskeleton can bring the maximum benefit is a fundamental step.

## INTRODUZIONE E OBIETTIVI DELLO STUDIO

L'uomo, privato della sua componente soggettiva, ed esaminato in chiave anatomica, è paragonabile ad una macchina e come tale, in particolari condizioni al contorno, può andare incontro a "mal funzionamenti". In termini medici questi 'mal funzionamenti' implicano l'insorgenza di malattie professionali, patologie o il verificarsi di infortuni. Osservando i report della banca dati INAIL [1], si riscontra che le patologie che maggiormente colpiscono il lavoratore italiano sono quelle muscolo-scheletriche (MSD). Diventa, quindi, necessario porsi il problema di ridurre l'insorgenza di tali malattie non solo ricorrendo a interventi di tipo organizzativo o procedurale, che possono non essere sufficienti o attuabili in tutte le realtà produttive, ma soprattutto implementare soluzioni tecnologicamente sempre più avanzate.

Negli ultimi anni, proprio grazie all'innovazione e allo sviluppo di nuove tecnologie, si sta espandendo la sperimentazione, soprattutto nel settore automotive, di nuovi dispositivi per ridurre il sovraccarico biomeccanico: gli esoscheletri, che, mutuati dall'ambito riabilitativo sono in grado di offrire un supporto attivo o passivo ad un segmento corporeo (arto superiore, tronco, arto inferiore) nel momento in cui viene assunta una postura incongrua durante lo svolgimento di specifiche attività lavorative.

In linea con gli avanzamenti tecnologici e la sperimentazione di tali dispositivi, anche FIAT-CHRYSLER AUTOMOBILES (FCA) ha implementato un progetto di valutazione sperimentale di esoscheletri per l'utilizzo nel contesto automotive attuando una fase sperimentale presso il laboratorio di ergonomia (ERGOLAB) nella sede storica di Mirafiori a Torino. In particolare, di seguito verrà presentata l'attività sperimentale eseguita su un esoscheletro per arti superiori, nato da una start up americana di St. Diego (CA): LEVITATE Technology INC [2].

Si tratta di un dispositivo completamente passivo, che sfrutta un meccanismo costituito da molle e smorzatori, per supportare gli arti superiori del lavoratore, in modo che all'assunzione di angoli maggiori di 60° da parte del giunto della spalla in condizione sia dinamica che statica, offra un supporto all'arto superiore.

L'esoscheletro in questione è molto simile ad uno zainetto, infatti, va indossato calzando due spallacci e regolandoli; dopodiché si chiude e si regola la fascia sulla vita che permette di scaricare la parte di tensione e di peso sulle anche.



!

Fig. 1 – Differenti prospettive dell'esoscheletro Levitate – da Levitate Technology.it.

Una volta indossato il dispositivo, bisogna "ingaggiare" (ovvero azionare) le molle presenti nelle cassette che svolgono il ruolo di supporto dell'arto superiore. E' importante sottolineare il fatto che, tutta l'azione di supporto compiuta dall'esoscheletro è dovuta a elementi passivi (per lo più elementi elastici e smorzanti), in quanto la legislazione attualmente in vigore vieta tassativamente l'utilizzo di elementi attivi, ovvero con fonte di alimentazione, a diretto contatto con il lavoratore.

La struttura smorzante e di supporto per l'arto superiore è contenuta all'interno di una "cassetta", che è unita al supporto per il braccio dell'operatore. Gli sviluppatori hanno predisposto diverse misure di "cassette", per essere funzionali a lavoratori con caratteristiche antropometriche differenti. Tramite questo esoscheletro, l'arto superiore riceve un supporto verso l'alto, utile a diminuire la richiesta muscolare ed il carico fisico in movimenti di sollevamento dell'arto scarico o in caso di utilizzo di strumenti di lavoro di peso limitato. Il sup-

porto passivo fornito dall'esoscheletro risulta vantaggioso anche come reazione alla resistenza statica, poiché porta ad una riduzione della richiesta muscolare e della sensazione di fatica che ne consegue. Quindi, un minore affaticamento porta ad una prestazione migliore, precisione più elevata e maggior produttività sul lavoro.

Per riportare il braccio in posizione neutra, ovvero rilassato lungo il corpo, è sufficiente la forza peso dell'arto che è in grado di abbattere la spinta offerta dall'esoscheletro. Se così non fosse, la forza muscolare necessaria per abbassare le braccia andrebbe a vanificare l'effetto benefico di supporto offerto dall'esoscheletro stesso.

Per garantire il miglior confort a chi indossa questo strumento, la struttura smorzante ha un range angolare di funzionalità limitato; ovvero entra in funzione solo se l'angolo tra spalla e corpo supera il valore di 60° e fino a raggiungere progressivamente l'effetto massimo di supporto a 90°. L'esoscheletro, inoltre, per essere il meno invadente possibile, è stato progettato in modo da pesare meno di 2 kg, peso che, essendo distribuito sul corpo ed essendo scaricato sulle anche risulta accettabile dall'operatore.

L'esoscheletro è una struttura rigida, e questo implica che ci sia una diminuzione della libertà di movimento, ma lo spazio di azione dell'arto superiore resta comunque ampio, permettendo all'operatore di muoversi liberamente per l'esecuzione delle attività lavorative.

I primi obiettivi della sperimentazione sono stati: valutare l'impatto che questo dispositivo può avere con gli

#### Prova STATICA



Fig.2 – Istantanea prova statica con esoscheletro

Il soggetto coinvolto deve mantenere un peso sulle braccia finché è in grado di sorreggerlo. La posizione del corpo è eretta, le braccia completamente distese in avanti, a formare un angolo di 90° con il corpo e i palmi rivolti verso l'alto. Ad una estremità del peso, rappresentato da uno spoiler (alettone), è fissato un pennarello; quest'ultimo, a contatto con una lavagna appositamente posizionata di fianco all'operatore, segna tutti i movimenti di adattamento/riadattamento che il soggetto compie nell'esecuzione della prova. Attraverso questa prova si vuole quindi testare se l'esoscheletro apporta un reale sostegno all'arto superiore durante il mantenimento di un peso contenuto (fase statica).

#### Prova DINAMICA



Fig.3 – Istantanee prova dinamica con esoscheletro

Il soggetto coinvolto viene collocato di fronte ad un banco da lavoro a due piani di diversa altezza. Il soggetto, da una posizione iniziale eretta e con le braccia a 90° dal corpo, deve spostare un peso di circa 3.5kg da un piano all'altro utilizzando solo le braccia e mantenendo una posizione del corpo adeguata. Il ritmo delle azioni viene dato da un metronomo impostato in modo che l'operatore compia 30 azioni al minuto (una azione = uno spostamento del peso). L'operatore, anche in questo può interrompere la prova quando vuole.

#### Prova di PRECISIONE



Fig.4 – Istantanea prova di precisione con esoscheletro

Nell'ultima prova, il soggetto coinvolto ha trovato davanti a sé, appeso al muro, un cartellone raffigurante un percorso composto da cinque file di ventidue archetti idealizzabili come una senoide. Il cartellone è sistemato in relazione all'altezza da terra della spalla dell'operatore, in modo che inizi la prova da una posizione eretta con un angolo di flessione della spalla di 90°. L'obiettivo dell'operatore è, tenendo il braccio sempre disteso e mantenendo una velocità bassa e costante, di seguire il massimo percorso con un pennarello in mano. Attraverso questo test, viene anche valutato un indice di precisione del soggetto, poiché come altra difficoltà, il segno con il pennarello va lasciato nello stretto spazio del percorso.

operai (sensazioni, vestibilità, opinioni ecc.) e verificare in termini quantitativi la riduzione del dello sforzo muscolare di spalla e collo dichiarato dagli sviluppatori. Parallelamente si è testato il dispositivo in attività simil vere della linea produttiva di FCA, per valutare l'accettabilità, l'usabilità, l'efficacia e la funzionalità nel contesto produttivo automotive.

## MATERIALI E METODI

La sperimentazione è stata suddivisa in due fasi. Oltre alla simulazione delle attività, sono state eseguite in parallelo delle valutazioni da parte degli ergonomi cognitivi che hanno somministrato dei questionari e hanno intervistato ciascun lavoratore che ha partecipato ai test.

1° fase - sono stati selezionati casualmente un determinato numero di lavoratori e per ognuno sono stati raccolti i dati antropometrici utili alla scelta della 'cassetta' più idonea e a verificare che l'esoscheletro progettato per un 50th percentile maschile americano fosse correttamente indossabile all'operatore.

Ogni lavoratore ha eseguito in successione tre diverse tipologie di prove, prima senza e poi con l'ausilio dell'esoscheletro: 2° fase - Terminata la prima fase di prove, è stato selezionato un sottogruppo di operatori, che hanno effettuato i test, per partecipare al focus group. La scelta degli operatori si è basata su conformazione fisica più idonea rispetto al riferimento del 50th percentile maschile americano con l'obiettivo di creare un gruppo tendente al neutro come valutazione dell'esoscheletro, ovvero avendo nel focus group soggetti più aperti alla nuova tecnologia e altri più restii. Scopo del focus group è stato quello di discutere insieme le principali caratteristiche, le limitazioni dell'esoscheletro e di creare insieme un esoscheletro "ideale".

Nella seconda fase del progetto, è stata eliminata la prova dinamica, ed è stata inserita una prova simil vera, ovvero un task che riproduceva un'attività caratteristica delle unità produttive degli stabilimenti FCA: montaggio delle guarnizioni vano porta, inserimento mollette sottoscocca e sigillatura del sottoscocca. In particolare, per le attività sottoscocca: l'operatore si trovava in posizione eretta sotto la scocca della vettura posizionata su gancio girevole e con le braccia alzate ha compiuto una serie di operazioni specifiche.

Questa fase ha permesso di testare l'efficacia, l'usabilità e le eventuali criticità nell'utilizzo del dispositivo in alcune attività simil vere del ciclo produttivo in quanto gli operatori hanno utilizzato l'esoscheletro in attività per le quali sono addestrati ed esperti. L'introduzione delle prove simil vere ha permesso di testare l'esoscheletro tenendo in considerazione i reali vincoli spaziali e geometrici della linea produttiva e ha permesso di avere dati più robusti in relazione all'accettabilità del dispositivo.

## RISULTATI

I risultati ottenuti sono stati analizzati in base alle prove.

### Prova statica:

Media prestazioni senza esoscheletro (s)	Media prestazioni con esoscheletro (s)	Media DeltaT (s)	Media incremento %
182,8	240,5	57,7	30,0%

Tab. 1 – tabella riassuntiva risultati medi della prova statica

Nella prima prova, è stato riscontrato che più dell'80% degli operatori coinvolti nel test con l'utilizzo dell'esoscheletro ha aumentato il tempo di mantenimento dell'oggetto in postura statica. Mediamente l'incremento temporale è stato del 30% valore coerente con i dati dichiarati dagli sviluppatori che riportavano una riduzione del sforzo muscolare del 32%. Analizzando i segni lasciati dal pennarello sulla lavagna, legati ai movimenti di adattamento dell'operatore allo sforzo fisico, si è osservato che indossare l'esoscheletro non comporta una variazione della postura assunta dal corpo o un maggior adattamento. Generalmente, sia senza che con esoscheletro, il comportamento posturale dell'operatore ha visto un graduale abbassamento delle braccia. Nella

prova eseguita indossando l'esoscheletro la velocità di abbassamento delle braccia si è mediamente ridotta.

#### Prova dinamica:

I dati ottenuti da questa prova sono stati quelli meno efficaci, in quanto gli operatori hanno portato a termine la prova, sia con che senza l'utilizzo dell'esoscheletro e, in alcuni casi, hanno dichiarato di essere in parte ostacolati dall'esoscheletro, in quanto il dispositivo, provocava spesso dei movimenti innaturali delle braccia nella fase di sollevamento/abbassamento del peso, ovvero tendeva a far aprire gli arti lateralmente portando il gomito verso l'alto, in movimenti che eseguiti naturalmente vengono eseguiti con gomito vicino al corpo.

#### Prova di precisione:

Media Prestazioni senza esoscheletro (s)	Media prestazioni con esoscheletro (s)	Media DeltaT (s)	Media incremento %	Media Prestazioni senza esoscheletro (N. archetti)	Media Prestazioni con esoscheletro (N. archetti)	Media Delta (N. archetti)	Media incremento %
348,7	462,5	113,7	40,9%	71,8	93,8	22,0	29,7%

Tab. 2 – tabella riassuntiva risultati medi della prova di precisione

La prova di precisione è stata la prova più completa, in quanto ha unito la componente di statica (mantenimento del braccio allungato) ed esecuzione dell'attività con una richiesta di precisione/qualità elevata. Anche in questo caso, i due parametri aumentano significativamente con l'ausilio dell'esoscheletro: + 40% in termini di tempo di esecuzione della prova e, in particolare, il numero di archetti completato è aumentato mediamente del 30% per quasi tutti gli operatori, dato che ancora una volta è in linea con i dati degli sviluppatori.

## DISCUSSIONE

Terminato il progetto e analizzati i dati, sono scaturiti i seguenti elementi:

- L'analisi quantitativa dei dati ha evidenziato che per attività caratterizzate da una componente statica del giunto di spalla, l'esoscheletro risulta funzionale, in quanto i risultati dei test e i dati raccolti hanno riportato un aumento del tempo medio di mantenimento delle posture e delle attività eseguite. Anche le interviste degli operatori hanno evidenziato un miglioramento percepito in termini di performance e di riduzione del senso di affaticamento biomeccanico degli arti superiori. L'analisi dei questionari somministrati agli operatori ha evidenziato che l'esoscheletro sembra utile e vantaggioso, ma che il suo utilizzo in ambito lavorativo deve essere volontario. Il dispositivo è considerato come uno strumento valido ed interessante, che potrebbe sicuramente essere vantaggioso per specifiche postazioni di lavoro.

Rimane ancora aperto il tema dell'analisi elettromiografica ed ecografica delle strutture muscolo-tendinee per valutare l'effetto che l'utilizzo di un esoscheletro possa avere sul giunto della spalla, questo approfondimento permetterebbe di verificare se vi è una diminuzione della fatica muscolare e della compressione dei tendini della spalla.

- L'esoscheletro nella forma prototipale presenta già una struttura compatta e aderente al corpo, ma è comunque un dispositivo aggiuntivo. Nella realtà produttiva, è importante eliminare il rischio da impigliamento e pizzicamento e progettare un dispositivo aderente senza elementi "penzolanti" che potrebbero agganciarsi a strumenti, strutture e macchinari durante lo svolgimento dell'attività lavorativa.

- Lo studio ha evidenziato che le postazioni che per geometria ed ingombri risultano più idonee per la sperimentazione in linea sono quelle relative alle attività di sottoscocca: ricordando che la scocca della vettura, una volta che sono stati eseguiti i riempimenti liquidi, non può più essere ruotata. Pertanto le attività residue che devono essere eseguite sottoscocca richiedono l'assunzione di una postura del giunto della spalla che

trarrebbe beneficio nel caso di utilizzo dell'esoscheletro.

- Le interviste agli operatori hanno evidenziato come sia fondamentale lavorare sul concetto di comodità inteso dagli operatori come: velocità nell'indossare il dispositivo autonomamente, praticità nell'uso e semplicità nell'eseguire le regolazioni necessarie per adattare la 'taglia' al singolo operatore. Pertanto è necessario capire se è possibile avere delle taglie standard o prevedere per ogni operatore un esoscheletro, tarato e regolato in base alle sue caratteristiche fisiche. La parte di training nell'indossare il dispositivo e nel utilizzarlo correttamente è un punto importante da sviluppare nel caso si decida l'adozione di questi dispositivi in linea produttiva.

- Non meno importante sarà ampliare la cultura della sicurezza dei lavoratori. Questi, infatti, dispongono già di molti dispositivi di protezione (DPI) e dovrà pertanto essere fornita l'adeguata formazione sul dispositivo specificando che non è un dispositivo di protezione individuale. È molto importante infondere nei lavoratori la cultura della prevenzione puntualizzando che l'esperienza lavorativa non è sinonimo di sicurezza e che i dispositivi assegnati devono essere usati seguendo le indicazioni fornite al fine di evitare infortuni e fattori di rischio.

- In fine, dal punto di vista della valutazione del rischio, si apre la domanda su quale impatto un dispositivo, come l'esoscheletro, possa avere in termini di livello di esposizione dei lavoratori in relazione alle patologie muscoloscheletriche. E come possano essere influenzate le valutazioni del rischio eseguite in fase di industrializzazione con il metodo EAWS (Ergonomic Assessment Work-Sheet) ed in fase di produzione con il metodo OCRA.

## CONCLUSIONI

In conclusione, la prima fase sperimentale in laboratorio di utilizzo di un esoscheletro passivo per arti superiori si è dimostrata positiva, ma ha evidenziato la necessità di proseguire la parte sperimentale integrando nuove analisi soprattutto l'analisi elettromiografica ed ecografica delle strutture muscolo-tendinee del giunto della spalla.

E' necessaria una base dati solida dei test di laboratorio per poter implementare una campagna di misura in linea. E solo dopo questa ulteriore fase si potrà valutare l'implementazione e l'efficacia nella linea produttiva. Per il momento l'utilizzo di esoscheletri in ambito lavorativo richiede ancora tempo e sperimentazione con la finalità di migliorare le attività lavorative, il benessere e la sicurezza dei lavoratori e di rendere ancora più efficace la prevenzione delle malattie muscoloscheletriche utilizzando l'avanguardia tecnologica.

Per quanto riguarda l'esoscheletro in questione, la sperimentazione ha evidenziato la possibilità di eseguire una sperimentazione anche in ambiti diversi da quello automotive per definirne e studiarne l'efficacia e l'usabilità.

Molto spesso, infatti, anche semplici attività come la pulizia vetri o la tinteggiatura comportano l'assunzione di posture incongrue dell'arto superiore, l'insorgenza di fatica muscolare, con particolare impegno biomeccanico del giunto articolare della spalla. Anche questi contesti potrebbero trarre beneficio dall'introduzione di un supporto come l'esoscheletro traendo effetti positivi in chiave di benessere.

## SITOGRAFIA

1. Bancadaticsa.inail.it [Home page su internet]. Italia: Istituto Nazionale Assicurazioni Infortuni sul Lavoro (INAIL), 2015 [aggiornato il 30 aprile 2016]. Disponibile all'indirizzo: <http://bancadaticsa.inail.it/bancadaticsa/bancastatistica.asp?cod=2>
2. Levitatetech.com [Home page su internet]. Stati Uniti: Levitate Technology. INC; sito web degli sviluppatori dell'esoscheletro, 2016. Disponibile all'indirizzo: <http://www.levitatetech.com>