

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Medicina

Corso di Laurea Magistrale in Scienze e Tecniche
dell'Attività Motoria Preventiva e Adattata

Tesi di Laurea

**INFLUENZA DI UN ESOSCHELETRO PASSIVO NELLA FORZA
MUSCOLARE IN LAVORATORI CHE SVOLGONO
MOVIMENTAZIONE MANUALE DEI CARICHI**

Relatore: Prof. Marco Bergamin

Laureando: Gianluca Gallina

N° di matricola: 2058047

Anno Accademico 2023/2024

INDICE

ABSTRACT - ITALIANO

ABSTRACT - INGLESE

1. INTRODUZIONE	1
1.1. Disturbi muscolo-scheletrici	2
1.1.1 Il rachide (colonna vertebrale).....	3
1.1.2 Gli arti superiori	5
1.1.3 Gli arti inferiori.....	5
1.1.4 Prevenzione	6
1.2. Esoscheletri indossabili.....	8
1.2.1. Impieghi e tipologie degli esoscheletri	9
1.2.2. Confronto tra esoscheletro attivo-passivo	10
1.2.3. Esoscheletri ad utilizzo industriale/lavorativo.....	11
1.2.4 Ottobock S.r.l.....	12
1.2.4.1 Paexo Back	13
1.2.4.1.1 Struttura e funzionamento	14
2. MATERIALI E METODI	15
2.1 Partecipanti	15
2.2 Protocollo.....	15
2.3 Strumentazione e raccolta dati	21
2.4 Analisi statistica	23
3. RISULTATI	25
4. DISCUSSIONE	31
5. CONCLUSIONI.....	35
BIBLIOGRAFIA	37
APPENDICE	41

ABSTRACT - ITALIANO

Il lavoro presentato in questo elaborato nasce dalla mia esperienza di ricerca e mi ha permesso di applicare alcuni insegnamenti acquisiti durante il mio percorso accademico.

Gli obiettivi che si pone questo studio sono quelli da un lato, di valutare se l'utilizzo di un esoscheletro passivo, il Paexo Back (Ottobock SE & Co. KGaA, Duderstadt, Germania), aumenta la forza massima erogata durante un test isometrico massimale in lavoratori che svolgono mansioni che prevedono movimentazione manuale dei carichi; dall'altro, di valutare la risposta all'utilizzo dello strumento in relazione a parametri come accettabilità, comfort o disagio percepito. In particolare, con questo elaborato si vuole analizzare se l'utilizzo del dispositivo ha aumentato la forza massima erogata durante un test isometrico massimale.

In questa esposizione sono stati analizzati i principali "disturbi muscolo-scheletrici" ("DMS") riscontrati in soggetti che svolgono mansioni lavorative che prevedono movimentazione manuale dei carichi. Attraverso una revisione della letteratura è stata effettuata una presentazione degli esoscheletri con riferimento a Paexo Back (dispositivo utilizzato durante la sperimentazione).

Nel secondo capitolo sono stati esposti il protocollo, i materiali e i metodi utilizzati durante lo studio. Durante la sperimentazione è stato condotto un test di forza della presa della mano insieme a prove di stacco isometrico massimale eseguite sia con che senza l'utilizzo dell'esoscheletro, e misurate attraverso una cella di carico. Compilate le acquisizioni ai partecipanti sono stati somministrati due questionari, il NASA TLX e delle domande sul comfort (o discomfort) del dispositivo, in modo tale da ottenere una valutazione della loro esperienza con l'esoscheletro Paexo Back.

Infine, negli ultimi capitoli sono stati presentati i risultati dello studio, con i grafici e le tabelle derivati, e relativa discussione di quest'ultimi.

Nell'ambito delle prove di stacco isometrico, l'integrazione di un esoscheletro passivo di supporto per la schiena ha dimostrato un impatto significativo sull'incremento della forza massima dei partecipanti. I risultati hanno evidenziato un miglioramento sostanziale, la forza massima espressa nella prova migliore è aumentata da una media di $135,51 \pm 31,24$ kg nella condizione senza l'uso dell'esoscheletro a $144,91 \pm 32,13$ kg con l'impiego del dispositivo di

supporto ($p < 0,002$), con una differenza media di $9,41 \pm 16,5$ kg nella forza massima tra le prove eseguite con e senza l'utilizzo del Paexo Back.

Questi dati promuovono l'efficacia dell'esoscheletro passivo nell'ottimizzazione delle prestazioni durante le attività di sollevamento, offrendo un contributo significativo al miglioramento della forza oltre che alla prevenzione e riduzione dei disturbi muscolo scheletrici e degli infortuni sul lavoro.

ABSTRACT - INGLESE

The work presented in this paper was born from my research experience and has allowed me to apply some of the skills learned during my academic journey.

The objectives of this study were, on one hand, to evaluate whether the use of a passive exoskeleton, the Paexo Back (Ottobock SE & Co. KGaA, Duderstadt, Germany), increased the maximum force expressed during a maximal isometric tests in workers performing tasks involving manual handling of loads; on the other hand, to assess the response to the tool in terms of parameters such as acceptability, comfort, or perceived discomfort. In particular, this work aimed to analyze if the use of the device increased the maximum force exerted during a maximal isometric test.

This exposition analyzes the main "musculoskeletal disorders" ("MSDs") found in subjects performing work tasks involving manual handling of loads. Through a literature review, an overview of available exoskeletons was presented, specifically focusing on the Paexo Back (the device used during the experimentation).

The second chapter analyzed the protocol, materials, and methods used during the study. Handgrip strength, and maximal isometric lifting tests with and without the use of the exoskeleton were conducted during the experimentation. Once the data acquisitions were completed, two questionnaires were administered to the participants, the NASA TLX and questions on the comfort (or discomfort) of the device, to evaluate their experience with the Paexo Back exoskeleton.

In the last chapters, the study results were presented, including derived graphs and tables, along with a discussion of these findings.

Regarding the maximal isometric lifting tests, the integration of a passive back support exoskeleton showed a significant effect in increasing the participants' maximum force production, with the maximum force in the best trial increasing from an average of 135.51 ± 31.24 kg in the condition without the exoskeleton to 144.91 ± 32.13 kg with the use of the support device ($p < 0.002$), with a mean difference of 9.41 ± 16.5 kg between the tests performed with and without the Paexo Back.

These data endorse the effectiveness of the passive exoskeleton in optimizing performance during lifting activities, offering a significant contribution to improving strength as well as the prevention and reduction of musculoskeletal disorders and workplace injuries.

1. INTRODUZIONE

Con questo studio si sono voluti indagare gli effetti dell'utilizzo di un esoscheletro passivo, il Paexo Back (Ottobock SE & Co. KGaA, Duderstadt, Germania), in lavoratori che svolgono mansioni che prevedono movimentazione manuale dei carichi.

Il termine "disturbo muscolo-scheletrico" (DMS) si riferisce ad un'ampia varietà di affezioni dell'apparato locomotore che possono interessare diverse strutture e sistemi del nostro organismo. Spesso queste problematiche colpiscono lavoratori che svolgono attività di sollevamento, ripetitive o che mantengono posture scorrette durante i loro turni di lavoro.

I problemi di salute causati da DMS vanno da malesseri e dolori di lieve entità sino a problemi più seri che costringono ad assentarsi dal lavoro e possono richiedere cure mediche. Infatti, in situazioni croniche, tali condizioni possono risultare così gravi da causare disabilità e costringere l'individuo ad interrompere il proprio lavoro in modo involontario.

Le azioni più frequentemente attuate per limitare l'insorgenza e la sintomatologia dei DMS sono la formazione dei nuovi lavoratori e gli interventi ergonomici per contrastare il rischio da sovraccarico biomeccanico. Tra queste azioni, l'uso di un supporto esterno chiamato esoscheletro è in forte aumento ma non è ancora molto diffuso a causa di molteplici ragioni, prima fra tutte la mancanza di consapevolezza ed accettazione.

Gli obiettivi dello studio sono, da un lato, di valutare se il dispositivo aumenta la forza massima erogata durante il test isometrico massimale; dall'altro, di valutare la risposta all'utilizzo dello strumento in relazione a parametri come accettabilità, comfort o disagio percepito. In questa esposizione, in particolare, andremo ad analizzare se l'esoscheletro passivo influenza la forza muscolare in lavoratori che svolgono mansioni con movimentazione manuale dei carichi.

1.1. Disturbi muscolo-scheletrici

I disturbi muscolo-scheletrici (DMS) costituiscono una vasta gamma di problemi che coinvolgono muscoli, tendini, legamenti, ossa, cartilagini, articolazioni, nervi e vasi sanguigni.

È comune che gli individui sperimentino mal di schiena, dolori al collo e alle braccia. Problemi che spesso sono attribuiti all'invecchiamento ma possono anche derivare da posture scorrette e da movimenti ripetitivi o sbagliati, sia durante le attività lavorative sia in quelle quotidiane.

Queste condizioni sono caratterizzate da sintomi dolorosi e limitazioni nella mobilità, talvolta accompagnate da manifestazioni che coinvolgono anche altre parti del corpo.

I disturbi muscolo scheletrici comprendono sia patologie ad insorgenza acuta e temporanea sia malattie croniche [1].

Nei Paesi industrializzati, i DMS legati allo sforzo biomeccanico sono ampiamente diffusi tra i lavoratori, incidendo negativamente sulla loro qualità di vita e rappresentando una delle principali cause di assenza di malattia in molte professioni.

Secondo l'INAIL, ogni anno oltre il 70% delle denunce di malattie professionali in Italia riguarda patologie muscolo-scheletriche, con una tendenza in costante aumento [2].

A livello europeo, quasi il 25% dei lavoratori soffre di mal di schiena e il 23% lamenta dolori muscolari. Percentuali significative di soggetti svolgono operazioni ripetitive con le mani o le braccia per un quarto dell'orario lavorativo, mentre molti altri lavorano in posizioni stancanti o dolorose e si occupano del trasporto di carichi pesanti.

In Italia, si stima che almeno cinque milioni di lavoratori si occupino regolarmente della movimentazione manuale di carichi. Tale attività comporta rischi di patologie muscolo-scheletriche a causa delle condizioni ergonomiche sfavorevoli e del sovraccarico biomeccanico [3].

Le conseguenze dei DMS sono rilevanti sia dal punto di vista sociale che economico. Queste causano sofferenza personale e possibili perdite di reddito per i lavoratori, riducono l'efficienza aziendale e impattano sulla spesa sanitaria e previdenziale del Paese.

Tuttavia, i disturbi muscolo-scheletrici non rappresentano un rischio inevitabile. I datori di lavoro e i lavoratori possono contribuire alla prevenzione o alla significativa riduzione di

questi problemi adottando e rispettando le norme di salute e sicurezza, seguendo pratiche lavorative corrette e facendo uso delle soluzioni disponibili per evitare questi rischi [2].

A seconda del tipo di attività lavorativa, diverse parti del corpo possono essere colpite da patologie muscolo-scheletriche legate al lavoro, dall'area della colonna vertebrale e della schiena alla gamba, dal polso all'anca, senza escludere collo e spalle [4].

1.1.1 Il rachide (colonna vertebrale)

Il fondamento strutturale del corpo umano è rappresentato dal rachide, noto anche come colonna vertebrale, composto da una serie di ossa chiamate vertebre, e dai dischi intervertebrali. Questa struttura custodisce il midollo spinale, una componente nervosa cruciale da cui si dipartono i nervi che raggiungono tutte le parti del corpo umano.

Muscoli e legamenti si ancorano alle vertebre.

Con l'invecchiamento, i dischi intervertebrali tendono a perdere la loro capacità di ammortizzazione, rendendo la schiena più suscettibile a disturbi, soprattutto nella regione lombare. Tale processo è accentuato sia da sforzi eccessivi che da uno stile di vita sedentario. Ad esempio, sollevare pesi piegati in avanti o con la schiena in torsione, rimanere per lungo tempo in posizioni statiche (sia in piedi che seduti) e svolgere attività che coinvolgono traino o spinta sono tutti fattori di rischio per lo sviluppo di disturbi muscolo scheletrici.

I disturbi muscolo-scheletrici più comuni legati all'ambito lavorativo e che possono interessare la colonna vertebrale includono lombalgia, ernia del disco e formazione di osteofiti articolari (artrosi) (Fig. 1.1).

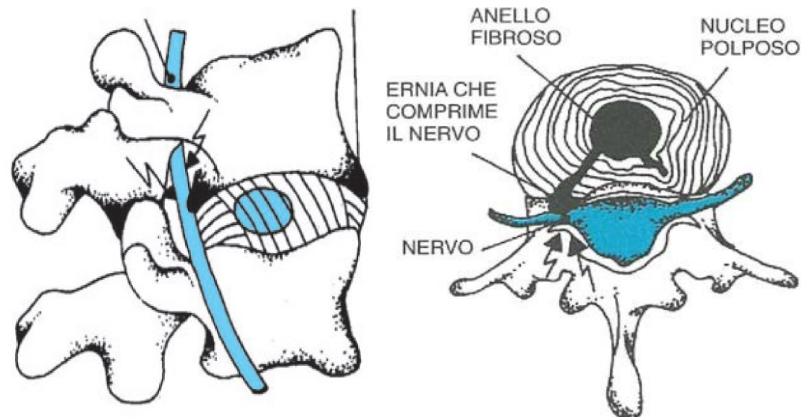


Figura 1.1. DMS che possono interessare la colonna vertebrale;
 1) becco artrosico posteriore che va a comprimere il nervo e 2) ernia che
 comprime il nervo

Inoltre, esistono varie alterazioni nella conformazione della colonna che possono essere congenite o derivare da un'attività fisica insufficiente. Esse sono significative ed aumentano il rischio di problemi alla schiena associati al lavoro.

Queste alterazioni possono essere scoliosi, dorso piatto, dorso curvo o ipercifosi e iperlordosi (Fig.1.2) [4].

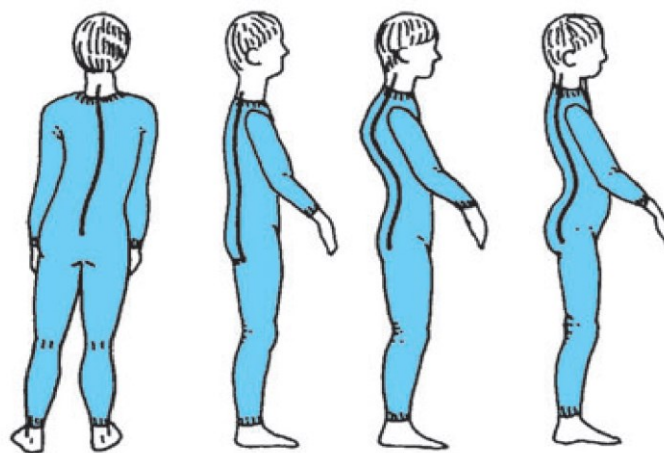


Figura 1.2. Alterazioni delle curve della colonna:
 scoliosi, dorso piatto, dorso curvo/ ipercifosi, iperlordosi

1.1.2 Gli arti superiori

I disturbi muscolo-scheletrici degli arti superiori coinvolgono principalmente la spalla, il gomito, il polso e la mano.

Le patologie più comuni in queste aree includono la periartrite scapolo-omerale (spalla), l'epicondilite e l'epitrocleeite (gomito), la sindrome del tunnel carpale e le tendiniti (polso, mano o spalla).

I sintomi principali includono formicolio, intorpidimento, perdita di forza, rigidità al collo e alla schiena, difficoltà nei movimenti e dolore agli arti superiori. Questi disturbi possono essere il risultato di posture scorrette mantenute per lungo tempo durante il lavoro e/o movimenti ripetitivi degli arti superiori [4].

1.1.3 Gli arti inferiori

I disturbi muscolo-scheletrici degli arti inferiori coinvolgono principalmente il ginocchio e il piede.

Queste condizioni spesso derivano da lavori prolungati svolti in posizioni scorrette, ad esempio piegati in avanti come nel caso dei posatori di moquette, parquet e piastrelle. Le patologie sono strettamente correlate sia all'intensità che alla durata delle attività che comportano stress ripetuti e microtraumi al ginocchio e al piede.

Nel caso del ginocchio, i disturbi più frequenti includono lesioni del menisco, borsiti prerotulee e tendinopatie, che possono essere causate da condizioni come la tendinite del rotuleo o del quadricipite.

Per quanto riguarda il piede, le alterazioni più comuni sono la tendinite d'Achille, la talalgia plantare e la sindrome del tunnel tarsale [4].

1.1.4 Prevenzione

L'EU-OSHA (Agenzia dell'Unione Europea per la sicurezza e la salute sul lavoro), nel 2017, ha avviato un progetto di ricerca quadriennale sui disturbi muscolo-scheletrici (DMS) legati al lavoro, che è terminato nel 2020. Questo sforzo di ricerca ha successivamente dato origine alla campagna 2020-22 dell'EU-OSHA incentrata sui DMS, mirante a promuovere e sostenere la prevenzione e la gestione dei DMS cronici in ambienti lavorativi [5].

L'obiettivo principale è stato quello di sensibilizzare e offrire supporto per la prevenzione e la gestione dei DMS cronici sul luogo di lavoro, coinvolgendo le autorità nazionali, i datori di lavoro e le organizzazioni di settore attraverso l'identificazione e la divulgazione di pratiche migliori.

I disturbi muscolo-scheletrici legati al lavoro solitamente si sviluppano nel tempo, spesso con molteplici fattori di rischio coinvolti, quali elementi fisici, biomeccanici, organizzativi, psicosociali e individuali.

Tra i fattori di rischio fisici e biomeccanici vi sono movimenti ripetitivi, una postura statica, il sollevamento scorretto di carichi, ritmi intensi di lavoro e condizioni ambientali sfavorevoli come vibrazioni, scarsa illuminazione o temperatura basse.

I fattori organizzativi e psicosociali comprendono l'elevata intensità lavorativa, l'assenza di pause, lavori veloci e a lungo termine, oltre a problematiche come il mobbing, le molestie e la bassa soddisfazione lavorativa.

In genere, questi fattori, specialmente quando combinati con rischi fisici, possono aumentare lo stress e la fatica, aumentando così il rischio di DMS.

Anche fattori individuali come la storia medica, la condizione fisica e lo stile di vita giocano un ruolo significativo.

Non esiste una soluzione universale ma spesso accorgimenti semplici ed economici possono ridurre i rischi, come l'uso di carrelli per movimentare le merci o modificare la disposizione degli oggetti sulla scrivania.

Per affrontare i DMS, i datori di lavoro dovrebbero condurre delle valutazioni dei rischi, coinvolgere i dipendenti nelle discussioni su possibili problemi e soluzioni, e implementare azioni preventive. Queste azioni possono riguardare la configurazione del luogo di lavoro,

l'adattamento dell'attrezzatura, il cambiamento dei metodi di lavoro, la pianificazione per evitare lavori ripetitivi o prolungati e la promozione di politiche aziendali volte a migliorare l'ambiente lavorativo.

È importante assicurare che tutti i lavoratori ricevano informazioni, istruzioni e formazione adeguate sulla salute e sulla sicurezza sul luogo di lavoro e che sappiano come evitare rischi e pericoli specifici.

Le azioni preventive dovrebbero considerare i cambiamenti tecnologici, monitorare la salute dei lavoratori, fornire riabilitazione e facilitare il reinserimento di coloro che soffrono di disturbi muscolo-scheletrici [6].

La formazione dei nuovi lavoratori e gli interventi ergonomici sono azioni frequentemente adottate per limitare l'insorgenza e la sintomatologia dei DMS.

Il coinvolgimento attivo dei lavoratori nelle questioni relative ai rischi sul lavoro è cruciale, poiché permette una conoscenza diretta del luogo di lavoro. Devono essere informati sui DMS e formati sulle azioni preventive così da poter tutelare la propria salute ed evitare rischi specifici.

1.2. Esoscheletri indossabili

Nel capitolo precedente sono stati definiti i principali disturbi muscolo-scheletrici che possono colpire i lavoratori, e in modo indiretto anche i datori di lavoro. Cresce, quindi, la necessità di individuare delle soluzioni per prevenire queste problematiche e per migliorare la condizione dei soggetti sul luogo di lavoro.

Recentemente sono stati introdotti nuovi strumenti di assistenza al movimento e alla riabilitazione, i quali potrebbero essere dei validi alleati anche in ambito industriale per tutelare la salute dei lavoratori.

Uno di questi strumenti è l'esoscheletro [7].

L'esoscheletro può essere definito in questo modo: “un apparecchio esterno in grado di potenziare le capacità fisiche (forza, agilità, velocità, potenza) dell'utilizzatore che ne viene rivestito e che costituisce una sorta di muscolatura artificiale” [8].

Esso, pertanto, è un dispositivo meccanico integrato, che può essere indossato e agganciato al corpo umano permettendo di supportare e facilitare il movimento di chi lo indossa. Ad esempio, un esoscheletro può permettere a persone con disturbi motori di riacquisire o migliorare la capacità di camminare ma anche aiutare gli individui nelle loro attività lavorative.

Sebbene l'uso dell'esoscheletro sia in crescita, sia in ambito riabilitativo che industriale, la sua diffusione è limitata principalmente a causa della scarsa consapevolezza e accettazione.

Questi dispositivi potrebbero essere una soluzione efficace per ridurre i disturbi muscolo-scheletrici, poiché sono progettati per alleviare il carico biomeccanico sulla colonna vertebrale, derivante da forze muscolari necessarie per sostenere il corpo e muovere i carichi, soprattutto nella parte bassa della schiena [9].

1.2.1. Impieghi e tipologie degli esoscheletri

Gli esoscheletri trovano impiego in diversi ambiti:

- Medico: sviluppati per migliorare la qualità della vita di individui privati dell'uso delle gambe e facilitare la riabilitazione di persone colpite da ictus o lesioni del midollo spinale, fornendo loro assistenza durante la camminata.
- Militare: esoscheletri leggeri equipaggiati dagli eserciti per ridurre l'affaticamento e aumentare l'efficienza dei soldati nei campi di battaglia.
- Civile: ad esempio i dispositivi utilizzati per aiutare pompieri e altri soccorritori a muoversi nelle scale trasportando equipaggiamento pesante.
- Industriale: esoscheletri attivi e passivi sviluppati per l'ambito industriale/manifatturiero con l'obiettivo di ridurre gli infortuni sul lavoro e gli errori derivanti dalla stanchezza [10].

Oltre a queste applicazioni, esistono diverse classificazioni degli esoscheletri.

Una di queste classificazioni si basa sulle parti del corpo che l'esoscheletro supporta, ovvero arto superiore, inferiore, tronco o full body (come rappresentato nella Figura 1.3) [11].

Alcuni modelli sono in grado di supportare contemporaneamente più parti del corpo, a seconda delle esigenze e dell'utilizzo previsto.

Un'altra classificazione riguarda la tipologia di esoscheletri.

Troviamo esoscheletri attivi, che richiedono una fonte di energia per attivare i sensori e gli attuatori (che possono essere elettrici, pneumatici o idraulici), passivi, che non richiedono fonti di energia, e semi passivi (quasi-passivi) con caratteristiche miste. [11]

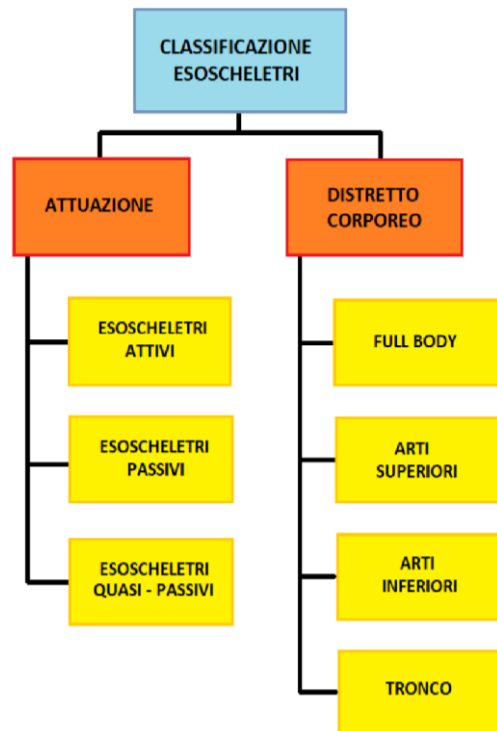


Figura 1.3. Classificazione esoscheletri

Infine, dal punto di vista dell'applicazione vengono classificati come dispositivi per la riabilitazione del cammino, per l'assistenza nella locomozione e per l'aumento della forza [12].

1.2.2. Confronto tra esoscheletro attivo-passivo

La storia degli esoscheletri attivi ha inizio negli anni '60, quando l'esercito statunitense li introdusse per scopi militari. Questi richiedono una fonte di energia costante per generare il movimento.

Un esoscheletro è definito attivo quando utilizza uno o più attuatori per sostenere o potenziare le capacità dell'individuo che lo indossa. Attualmente, la maggior parte degli esoscheletri si basa su sistemi elettrici o ad aria pressurizzata (pneumatici). Attraverso dei sensori posizionati sulla struttura vengono raccolti dei dati sul movimento intenzionale dell'utente, i quali vengono elaborati da un regolatore che comunica con gli attuatori per far muovere l'esoscheletro e la persona nel modo più appropriato.

I sistemi più comunemente utilizzati sono i motori elettrici, noti per l'alta efficienza e la possibilità di regolare la velocità a seconda della necessità di coppia su una giuntura. Anche gli attuatori idraulici sono impiegati ma hanno un'applicazione limitata a causa delle potenziali perdite di fluido e della complessa gestione dei tubi.

L'alimentazione di un esoscheletro attivo può avvenire tramite batterie al litio o collegandolo direttamente a una fonte di energia esterna.

D'altra parte, un esoscheletro viene definito passivo quando non utilizza degli attuatori ma sfrutta molle o smorzatori per accumulare energia durante il movimento umano, e impiegarla successivamente per mantenere una posizione specifica, come la flessione del tronco.

Infine, esiste una tipologia semi-passiva (o quasi-passiva) di esoscheletro, la quale utilizza componenti come valvole o frizioni con caratteristiche passive ma che richiedono una fonte di energia per il loro controllo [13].

1.2.3. Esoscheletri ad utilizzo industriale/lavorativo

Originariamente sviluppati e impiegati in ambito militare e riabilitativo, gli esoscheletri sono oggi una realtà in rapida affermazione anche nel settore industriale-manifatturiero.

Gli esoscheletri industriali (esempi nella Fig. 1.4) sono strutture meccaniche esterne indossabili che forniscono supporto a uno o più giunti, riducendo il sovraccarico biomeccanico e l'affaticamento. [14]

Questi dispositivi si suddividono in diverse categorie, principalmente in base al distretto corporeo che vanno a supportare e alla tipologia di attuazione.

L'Istituto Italiano di Tecnologia (IIT) e l'INAIL collaborano in modo sinergico per rendere i luoghi di lavoro più sicuri, sostenendo politiche e progetti volti a ridurre gli infortuni e le malattie professionali. Tra queste misure proposte troviamo anche l'implementazione di esoscheletri per l'utilizzo da parte di lavoratori di alcuni settori e strutture lavorative [15].

Il miglioramento della qualità del lavoro è un elemento fondamentale per la competitività e il successo aziendale. Gli avanzamenti nel campo della bioingegneria per la progettazione di esoscheletri industriali sono quindi cruciali per un mercato che deve evolversi parallelamente al benessere fisico e mentale dei suoi lavoratori.



Figura 1.4. Esempi di esoscheletri utilizzati in ambito industriale;

- 1) esoscheletro passivo Ottobock Paexo Back e 2) esoscheletro attivo motorizzato Hyundai H-LEX [14]

1.2.4 Ottobock S.r.l.

Tra le aziende leader nel settore della produzione di esoscheletri ad utilizzo industriale troviamo sicuramente la Ottobock S.r.l. (Duderstadt, Germania).

Il percorso di questa impresa ha radici nel 1919, quando Otto Bock avviò la Orthopädische Industrie GmbH a Berlino, considerabile una vera e propria startup secondo i termini moderni. L'azienda ha inizialmente rivoluzionato il mercato producendo in serie componenti protesici e dispositivi medici, risolvendo in modo efficiente le esigenze mediche delle numerose vittime della Prima guerra mondiale.

Da allora, Ottobock ha progressivamente ampliato il proprio interesse verso il settore industriale, con l'obiettivo di rendere l'ambiente lavorativo ergonomico e sostenibile. Un focus particolare è stato rivolto verso le problematiche fisiche connesse al lavoro, come il sollevamento di oggetti pesanti che è una delle cause più comuni di disturbi muscolo-scheletrici quali dolori alla schiena, alle spalle, al collo e alle ginocchia, che spesso portano ad assenze per malattia.

Fin dal 2012, Ottobock ha concentrato i suoi sforzi nella ricerca di soluzioni volte a fornire supporto a coloro che svolgono compiti fisicamente impegnativi.

Un esempio tangibile è la gamma di esoscheletri Paexo, progettata appositamente per fornire supporto biomeccanico nelle postazioni di lavoro [16].

Con l'obiettivo di espandere il proprio impegno verso un ambiente di lavoro sano e sostenibile, all'inizio del 2018, Ottobock ha istituito la divisione Bionic Exoskeletons, canalizzando così l'esperienza aziendale nel settore della tecnologia medica verso la produzione di esoscheletri per luoghi di lavoro.

Questi servizi sono forniti con il nome Ottobock SE & Co [17].

Gli esoscheletri prodotti da Ottobock operano su un principio biomeccanico passivo, non richiedendo energia elettrica per il loro funzionamento. Essi interagiscono in modo preciso con le forze di pressione e trazione durante i movimenti del corpo, accumulando e rilasciando energia in modo tempestivo.

Questi dispositivi hanno la capacità di ridurre lo sforzo percepito su braccia e spalle durante lavori in elevazione e sulla parte bassa della schiena durante il sollevamento [18].

Per quest'ultimo caso è stato sviluppato l'esoscheletro Paexo Back, oggetto del presente progetto di tesi.

1.2.4.1 Paexo Back

L'esoscheletro utilizzato in questo studio è stato il Paexo Back (Ottobock SE & Co. KGaA, Duderstadt, Germania).

Questo dispositivo (mostrato nella Fig. 1.5) è leggero, con un peso di 3,9 kg, e di tipo passivo (a molla).

È stato progettato appositamente per alleviare lo stress nella regione lombare L5-S1.

La sua funzione principale è fornire sollievo alla parte bassa della schiena durante l'attività di sollevamento di carichi pesanti o ripetuti.

L'esoscheletro è dotato di un sistema di controllo meccanico situato sull'anca, che riconosce automaticamente i movimenti di piegatura e di camminata e che può essere disattivato durante la normale deambulazione.

Questa funzione garantisce ai lavoratori un ampio grado di libertà nei movimenti.

Inoltre, anche il livello di supporto può essere regolato in modo continuo tramite una manopola rotante, consentendo così un adattamento costante a diverse fasi di lavoro [19].



Figura 1.5. Esoscheletro Paexo Back utilizzato in ambito industriale

1.2.4.1.1 Struttura e funzionamento

L'esoscheletro viene indossato come uno zaino, fissandosi alle spalle, alla vita e alle cosce.

Le parti dell'esoscheletro (Figura 1.6) [20] – la cintura attorno alla vita, le cinghie delle spalle con aste rigide e i supporti delle cosce con sistema a molla – sono interconnesse da snodi che consentono movimenti indipendenti quando il supporto non è attivo.

Quando il supporto è attivato e l'utente si china in avanti, le forze vengono trasferite alle gambe attraverso le aste, mentre il sistema a molla converte l'energia cinetica dal movimento del tronco in energia potenziale elastica immagazzinata negli espansori. Questo processo fornisce un sostegno quando il soggetto si piega in avanti.

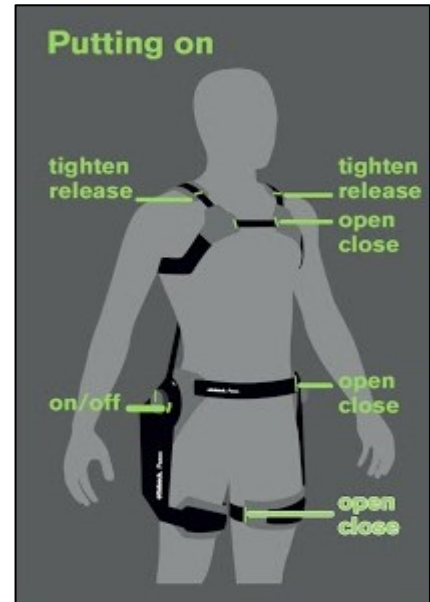


Figura 1.6. Parti esoscheletro Paexo Back [19]

L'articolazione rotatoria su cui agisce il momento di sostegno dell'anca è situata all'altezza del grande trocantere. Questa agisce come punto di supporto per l'anca, incrementando il sostegno quasi linearmente con la flessione.

L'attivazione di questo supporto è regolabile tramite manopole, a seconda dell'attività lavorativa e delle preferenze dell'utilizzatore. Inoltre, un sistema di frizione meccanica rileva se l'utente cammina o si alza, attivando o disattivando rispettivamente il meccanismo di supporto a molla [21].

Quando il tronco si estende in posizione eretta, l'energia potenziale elastica viene rilasciata, sostenendo l'utente e riducendo il carico sulla parte bassa della schiena fino a 25 kg [22].

Il design di questo sistema è unico ma adattabile a diverse conformazioni corporee. È possibile regolare la larghezza e la profondità degli spallacci, la lunghezza delle aste posteriori e le circonferenze delle cinture attorno alla vita e alle cosce.

2. MATERIALI E METODI

2.1 Partecipanti

Lo studio è stato effettuato su 34 lavoratori (età $29,74 \pm 10,69$ anni, statura $177,07 \pm 8,33$ cm, massa corporea $76,54 \pm 13,13$ kg), tutti di sesso maschile.

Per il loro reclutamento è stato tenuto conto della professione praticata, dello stato di salute e dell'età, la quale doveva essere compresa tra i 18 e i 65 anni.

Tutti i soggetti che hanno partecipato allo studio dovevano svolgere mansioni lavorative che prevedono movimentazione manuale dei carichi.

Inoltre, per prendere parte alla sperimentazione, i partecipanti dovevano godere di una condizione di salute stabile, e non soffrire di disturbi muscolo scheletrici (DMS), cardiovascolari o neurologici.

In particolare, per la partecipazione allo studio i soggetti non dovevano presentare:

- 1) Malattia coronarica con eventi di angina pectoris o cambiamenti rilevanti del tratto -ST o infarto del miocardio negli ultimi sei mesi.
- 2) Claudicatio intermittens sintomatica o neuropatia periferica.
- 3) Disturbi neurologici noti o menomazioni cognitive.
- 4) Eventi di lombalgia nell'ultimo anno.

2.2 Protocollo

Lo studio prevedeva che i partecipanti svolgessero un test di forza e due questionari, con lo scopo di verificare l'effettiva efficacia di un dispositivo passivo di supporto del rachide lombare (Paexo Back, Ottobock SE & Co. KGaA, Duderstadt, Germania) in termini di aumento della forza massima erogata.

Gli incontri sono stati supervisionati da laureati in Scienze Motorie e Specialisti dell'Esercizio Fisico.

Durante la prima fase del protocollo di attività sono stati valutati i criteri di partecipazione allo studio. Per fare ciò, una volta arrivati presso la sede dello studio, a tutti i partecipanti è stato richiesto nome, cognome, età, professione e ne è stato verificato lo stato di salute.

Inoltre, prima di sottoporsi alla sperimentazione i soggetti hanno preso visione e firmato l'espressione del consenso informato alla partecipazione al programma e il consenso al trattamento dei dati personali.

Successivamente sono stati misurati statura e massa corporea, ed è stato somministrato il Mini-Mental State Examination (MMSE). Questo breve esame neuropsicologico è conosciuto in letteratura e nella pratica medica con diversi nomi, come Test di Folstein, MMSE, MMS o Test Mini Mental Status. Il test è stato pubblicato per la prima volta, nel 1975, sul rinomato Journal of Psychiatric Research,

Si tratta essenzialmente di un questionario (punteggio minimo di 24/30) (Fig. 2.1) [23] composto da domande semplici e grafici, utili per esaminare vari aspetti delle funzioni cerebrali come:

- Orientamento;
- Memoria;
- Attenzione;
- Capacità di calcolo;
- Capacità di richiamare determinate acquisizioni;
- Linguaggio [24].

Questo test viene utilizzato per la valutazione dei disturbi dell'efficienza intellettiva e della presenza di deterioramento cognitivo.

MINI-MENTAL STATE EXAMINATION	
<i>(Folstein M.F., Folstein S., McHugh P.R., J.Psychiatr.Res;12:189-198, 1975)</i>	
1. Orientamento temporo-spaziale	
Il paziente sa riferire il giorno del mese, l'anno, il mese, il giorno della settimana e la stagione.	[0] [1] [2] [3] [4] [5]
Il paziente sa riferire il luogo in cui si trova, a quale piano, in quale città, regione, stato.	[0] [1] [2] [3] [4] [5]
2. Memoria	
L'esaminatore pronuncia ad alta voce tre termini (casa, pane, gatto) e chiede al paziente di ripeterli immediatamente.	[0] [1] [2] [3]
L'esaminatore deve ripeterli fino a quando il paziente non li abbia imparati (max 6 ripetizioni). Tentativi n. _____	
3. Attenzione e calcolo	
Far contare per sette all'indietro, partendo da 100. Fermarsi dopo le prime 5 risposte. Se il paziente avesse difficoltà di calcolo, far scandire all'indietro la parola "MONDO" una lettera alla volta.	[0] [1] [2] [3] [4] [5]
4. Richiamo delle tre parole	
Richiamare i tre termini precedentemente imparati.	[0] [1] [2] [3]
5. Linguaggio	
Il paziente deve riconoscere due oggetti. Come si chiama questo? (indicando una matita). Come si chiama questo? (indicando un orologio).	[0] [1] [2]
Invitare il paziente a ripetere la frase "TIGRE CONTRO TIGRE".	[0] [1]
Esecuzione di un compito su comando. Invitare il paziente ad eseguire correttamente i seguenti ordini: a) prenda un foglio con la mano destra, b) lo pieghi a metà, c) e lo butti dal tavolo.	[0] [1] [2] [3]
Presentare al paziente un foglio con la seguente scritta: "Chiuda gli occhi". Invitare il paziente ad eseguire il comando indicato	[0] [1]
Far scrivere al paziente una frase formata almeno da soggetto e verbo.	[0] [1]
Far copiare al paziente il disegno indicato. (Il materiale delle ultime due prove va conservato)	[0] [1]
PUNTEGGIO COMPLESSIVO	_____/30
PUNTEGGIO COMPLESSIVO AGGIUSTATO	_____/30
LIVELLO DI COSCIENZA DEL PAZIENTE: 1) Allerta 2) Assopito 3) Stupor 4) Coma	

Figura 2.1. Tabella di valutazione Mini Mental State Examination (MMSE) [22]

Dopo il MMSE, ai partecipanti è stato richiesto di svolgere con il loro arto dominante un Handgrip strength test.

Per questo test è stata eseguita una sola prova così da ottenere una misurazione diretta della forza di prensione della mano del partecipante che si stava sottoponendo alla sperimentazione.

Il soggetto ha eseguito l'Handgrip strength test in posizione eretta con il gomito a 90 gradi e vicino al corpo, e la richiesta è stata quella di premere la maniglia del dispositivo il più forte possibile con il proprio arto dominante (Fig. 2.2).

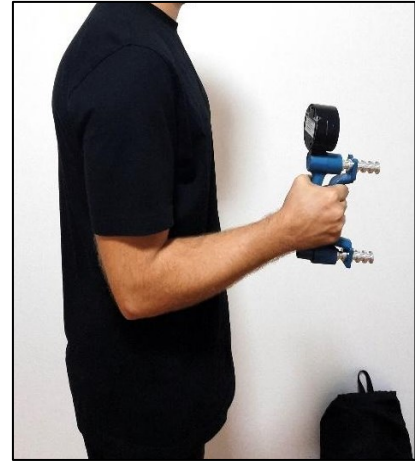


Figura 2.2. Svolgimento Handgrip strength test

Una volta raccolti questi primi dati, i partecipanti hanno svolto un breve riscaldamento per prepararsi alle prove di forza isometrica. Questa fase di attivazione motoria ha previsto che ogni partecipante svolgesse 5 minuti di bike e tre serie di mezzi stacchi (o stacchi rumeni) con 60 secondi di riposo tra l'una e l'altra. Quest'ultimo esercizio è stato svolto con un bilanciere scarico da 8 kg, con lo scopo di far familiarizzare il soggetto con il gesto motorio (Fig. 2.3).



Figura 2.3. Strumentazione per il riscaldamento;

1) bike per un breve riscaldamento cardiovascolare e 2) Postazione con bilanciere per attivazione e familiarizzazione con il gesto motorio

Durante i test di forza massima isometrica è stato richiesto di tirare verso l'alto e il più forte possibile una barra fissata ad una cella di carico e ancorata a terra. La forza di trazione è stata mantenuta per un periodo di tre secondi ed è stata registrata la forza massima sviluppata. La posizione che è stata assunta dai partecipanti per lo svolgimento del test è quella in mezza accosciata, molto frequente durante i turni di lavoro di persone che svolgono mansioni con movimentazione manuale dei carichi.

In questo modo si è voluto andare a verificare la forza dei muscoli lombari, paravertebrali e degli arti inferiori.

Le prove sono state eseguite con e senza l'utilizzo dell'esoscheletro. Le due condizioni sono state presentate in modo randomizzato ai soggetti, ed è stato chiesto loro per ciascuna situazione di eseguire 3 prove distinte con 90 secondi di riposo tra l'una e l'altra (Fig. 2.4).

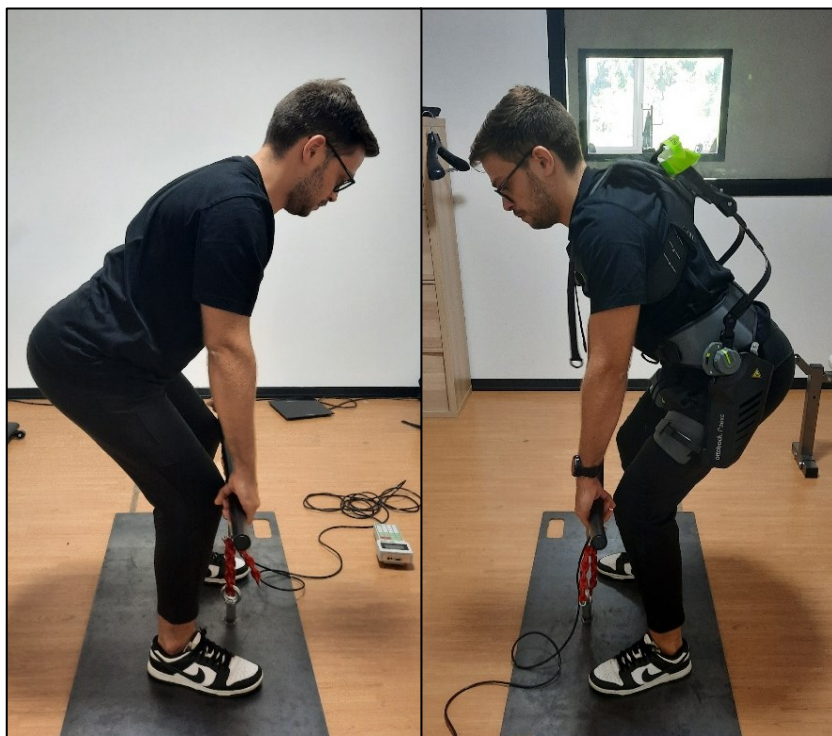


Figura 2.4. Prove di forza massima isometrica;
1) senza l'utilizzo dell'esoscheletro e 2) con l'esoscheletro Paexo Back della Ottobock

Completate le acquisizioni sono stati somministrati gli ultimi questionari, delle domande sul comfort (o discomfort) dell'esoscheletro Paexo Back (Ottobock SE & Co. KGaA, Duderstadt, Germania) e il NASA-TLX.

Il NASA-TLX rappresenta uno strumento ampiamente adottato per ottenere una valutazione soggettiva del carico di lavoro percepito da un soggetto durante una determinata attività. Questo questionario è stato sviluppato presso lo Human Performance Group dell'Ames Research Center della NASA, durante un ciclo di sviluppo triennale che ha coinvolto oltre 40 simulazioni di laboratorio.

In questo studio è stato valutato il carico di lavoro percepito dai partecipanti, utilizzando l'esoscheletro, attraverso sei parametri valutati dal questionario:

- Prestazione;
- Sforzo;
- Domanda mentale;
- Domanda fisica;
- Domanda temporale;
- Frustrazione [25].

2.3 Strumentazione e raccolta dati

La raccolta dei dati è stata effettuata attraverso scheda di valutazione, questionari e strumentazione elettronica.

Nella tabella di valutazione utilizzata per lo studio sono stati inseriti nome e cognome, età, statura, peso, arto dominante e mansione lavorativa del partecipante.

Altri dati sono stati ricavati a seguito dell'Handgrip strength test, dei questionari (MMSE, questionario sul comfort e NASA-TLX) e delle prove di forza massima isometrica eseguite con e senza l'esoscheletro Paexo Back.

Lo strumento di misurazione utilizzato per l'Handgrip è stato il dinamometro idraulico manuale della Baseline® (Fabrication Enterprise Inc., New York, USA) [26] (Figura 2.5).



Figura 2.5. Dinamometro della Baseline® utilizzato durante l'Handgrip strength test

Per quanto riguarda la strumentazione elettronica delle prove di forza massima isometrica è stato impiegato l'Ergo Meter v 1.5 della Globus [27] (Domino S.r.l., Treviso, Italia) (Fig. 2.6), una cella di carico che ha permesso di ottenere informazioni sulla forza espressa dal soggetto durante l'esecuzione dei test di forza.

L'unità di misura utilizzata per misurare la forza è stata il chilogrammo (kg), sia nell'Handgrip strength test sia nelle prove di stacco isometrico.



Figura 2.6. Postazione e strumentazione utilizzate durante le prove di forza massima isometrica;

- 1) Postazione con pedana di ferro su cui è ancorata una sbarra collegata, a sua volta, ad una cella di carico e 2) Cella di carico utilizzata per la rilevazione della forza, l'Ergo Meter v 1.5 della Globus

La forza massima è stata rilevata con e senza l'utilizzo dell'esoscheletro Paexo Back (Ottobock SE & Co. KGaA, Duderstadt, Germania), quantificando i miglioramenti (o peggioramenti) ottenuti dall'utilizzo del dispositivo.

Vista la grande variabilità fra le prove è stata tenuta in considerazione la misura migliore delle tre, che in genere è stata l'ultima per entrambe le condizioni.

Questa differenziazione e miglioramento nei risultati dei test possono essere legati a fattori riguardanti l'adattamento, la familiarizzazione e l'ambientamento del soggetto all'esoscheletro e al compito richiesto.

2.4 Analisi statistica

È stato utilizzato il test t di Student per dati appaiati a due code per valutare la differenza tra i valori di forza nelle prove di stacco isometrico nelle due condizioni, con e senza esoscheletro, e il grado di significatività della correlazione tra la forza espressa durante l'Handgrip strength test e quella espressa nella prova isometrica senza utilizzo dell'esoscheletro.

Il t-test è un test statistico utilizzato per il confronto tra i dati di due popolazioni o di una stessa popolazione in due condizioni rispetto ad un determinato parametro, per confermare o rigettare l'ipotesi nulla (differenza medie = 0). Nello specifico, attraverso questo test, si confronta la differenza tra la media di due gruppi (o condizioni diverse nello stesso campione), tenendo in considerazione la dispersione dei dati.

Il livello di significatività è stato fissato ad un valore $p < 0.05$.

I risultati sono stati rappresentati mediante box plot per le due prove, istogrammi sovrapposti in due colori diversi e uno scatterplot connettendo le due condizioni per ogni partecipante.

La normalità dei dati è stata testata disegnando grafici Q-Q plot, che rappresentano la distribuzione dei risultati ottenuti per ciascuna condizione.

Per quantificare la differenza tra le due condizioni (Exo; No Exo) è stato calcolato l'Effect size. Questo perché mentre il p value può dirci se esiste una differenza statisticamente significativa tra le due condizioni, e quanto è invece probabile che l'effetto sia casuale, l'Effect size indica quanto effettivamente sia grande questa differenza.

L'Effect size è stato calcolato con la misurazione della differenza media standardizzata, attraverso la d di Cohen per coppie appaiate [28]. Secondo l'interpretazione classica di questa misura, un $d=0,2$ corrisponde a una dimensione dell'effetto piccola; un $d=0.5$ è un effetto medio e $d=0.8$ è un grande Effect size [29].

Infine, per individuare il grado di correlazione tra forza con e senza esoscheletro, e tra forza di presa dell'arto dominante e forza senza esoscheletro, è stato calcolato il coefficiente di correlazione (noto anche come "r di Pearson" o "coefficiente di correlazione prodotto-momento"), che misura l'associazione lineare tra due variabili, e che assume sempre un valore compreso tra -1 (correlazione lineare perfettamente negativa) e 1 (correlazione lineare perfettamente positiva) [30].

3. RISULTATI

I risultati ottenuti attraverso la raccolta dati hanno permesso di evidenziare come l'uso dell'esoscheletro passivo Paexo Back (Ottobock SE & Co. KGaA, Duderstadt, Germania) abbia permesso di sviluppare una maggiore forza durante i test di stacco massimale isometrico. (Fig. 3.1)

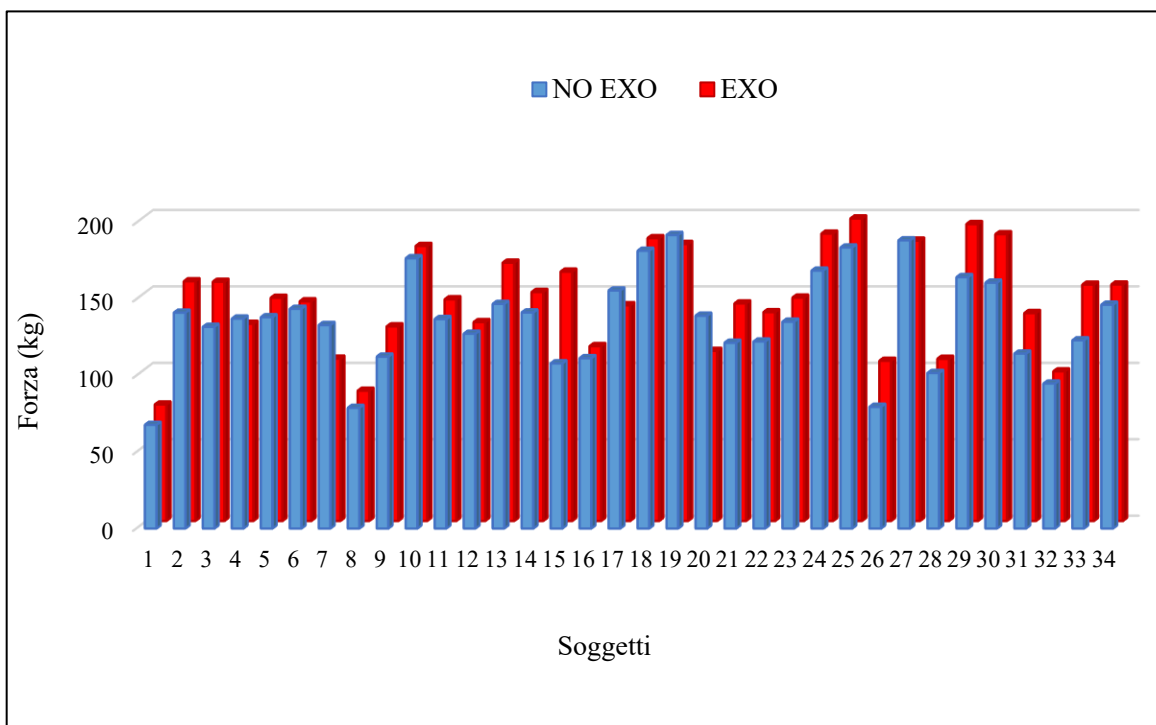


Figura 3.1 Istogramma sovrapposto con i risultati delle migliori prove (Exo; No Exo) dei 34 lavoratori che hanno partecipato alla sperimentazione.

Dai box plot (Fig. 3.2) possiamo confermare quanto affermato in precedenza, i dati delle due prove sperimentali mostrano il beneficio apportato dall'uso dell'esoscheletro.

Infatti, questi grafici rappresentando la forza massima media ottenuta nelle due condizioni (Exo; No Exo) permettono di rappresentare in maniera più chiara, rispetto all'istogramma sovrapposto, l'efficacia dell'esoscheletro nel migliorare le performance dei partecipanti.

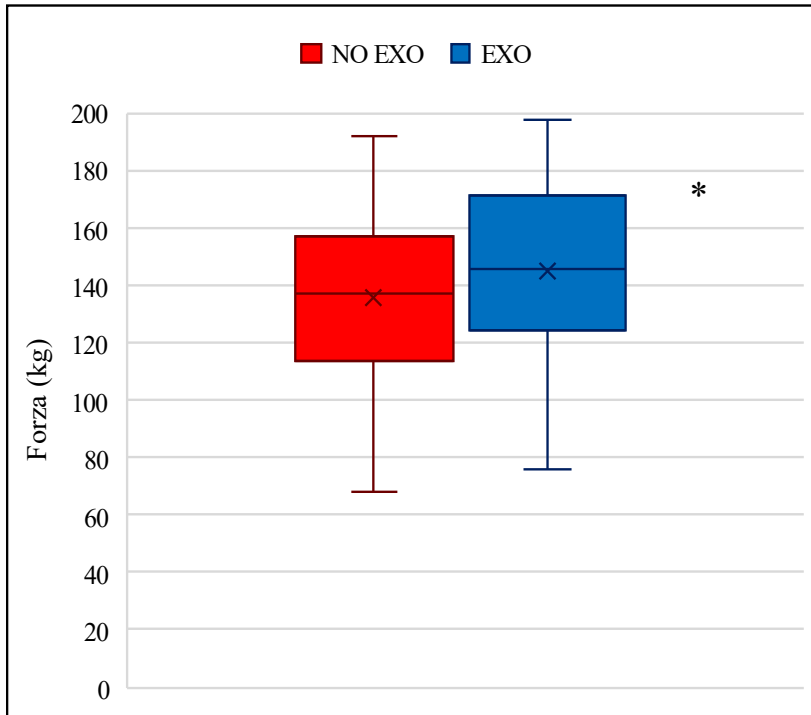


Figura 3.2.
Box Plot con i dati delle prove di forza con e senza esoscheletro (Exo; No Exo).
(*: $p < 0,05$)

In particolare, il miglioramento della forza massima ($135,51 \pm 31,24$ kg vs $144,91 \pm 32,13$ kg, $p < 0,002$), è stato del 6,94% nella condizione con l'utilizzo di Paexo Back rispetto alla condizione senza l'esoscheletro. Per calcolare la significatività del risultato abbiamo utilizzato la differenza tra la forza massima rilevata nelle prove con e senza l'utilizzo del dispositivo di supporto ($9,41 \pm 16,5$ kg) (Tab. 1).

Tabella 1. Differenza media assoluta e deviazione standard delle differenze della forza massima espressa dai partecipanti durante la loro migliore prova nelle due condizioni (Exo; No Exo);

(* = $p < 0,05$)

	<i>NO EXO</i>		<i>EXO</i>	
	Media	Dev. Standard	Media	Dev. Standard
<i>Forza Massima (kg)</i>	135,51	31,24	144,91	32,13
<i>F_{exo} - F_{noexo} (kg)</i>	$9,41 \pm 16,5^*$			

Per valutare la differenza tra i valori medi di forza nelle prove di stacco isometrico, sia con che senza l'ausilio dell'esoscheletro, è stato utilizzato il test t di Student per dati appaiati a due code. I risultati hanno mostrato differenze significative ($135,51 \pm 31,24$ kg vs $144,91 \pm 32,13$ kg, $p < 0,002$), indicando un miglioramento nella performance con l'uso dell'esoscheletro.

Il coefficiente di correlazione (r di Pearson) tra le due condizioni (Exo; No Exo) è risultato essere pari a 0,865. Visto che la relazione è debole quando il valore del coefficiente è prossimo a zero, mentre è forte quando esso si avvicina a 1, la correlazione lineare è risultata essere molto forte.

Per valutare ulteriormente la differenza tra le condizioni, è stato calcolato l'Effect Size tramite la d di Cohen. Il valore della d di Cohen è risultato essere pari a 0,57, rientrando nella categoria di Effect size moderata, secondo la formula che associa $d = 0.5$ a una dimensione dell'effetto media (Tab. 2).

Tabella 2. Tabella riassuntiva risultati più importanti nella raccolta dati dello studio.

	<i>NO EXO</i>		<i>EXO</i>	
	Media	Dev. Standard	Media	Dev. Standard
<i>Forza Massima (kg)</i>	135,51	31,24	144,91	32,13
<i>Pearson (r)</i>	0,865			
<i>Cohen (d)</i>	0,57			

Invece, per la valutazione della correlazione tra la forza di prensione misurata durante l'Handgrip test e la forza espressa nella prova isometrica senza l'utilizzo dell'esoscheletro è stato calcolato il valore t ($t = 1,93$). Tuttavia, l'analisi non ha mostrato una correlazione significativa tra queste due variabili ($41,53 \pm 7,92$ kg vs $135,51 \pm 31,24$ kg, $p > 0,06$) (Tab. 3).

Tabella 3. Risultati Handgrip strength test e prova di stacco massimale isometrico senza Paexo Back

	<i>HG test</i>		<i>NO EXO</i>	
	Media	Dev. Standard	Media	Dev. Standard
<i>Forza Massima (kg)</i>	41,53	7,92	135,51	31,24
<i>P value</i>	0,06 *			

* risultato non significativo ($p > 0,05$)

Oltre ai box plot e all'istogramma sono stati creati i Q-Q plot, per entrambe le condizioni della prova previste nello studio (Exo; No Exo). (Fig 3.3)

Il grafico Q-Q (Quantile-Quantile) è stato utilizzato per valutare la conformità di un insieme di dati a una distribuzione normale.

Questo tipo di grafico confronta i quantili osservati con i quantili teorici di una distribuzione normale. Se i dati seguono una distribuzione normale, i punti nel grafico QQ si allineano lungo una linea diagonale retta. Al contrario, un allontanamento significativo dei punti dalla linea diagonale indica una minore probabilità che l'insieme di dati segua una distribuzione normale [31].

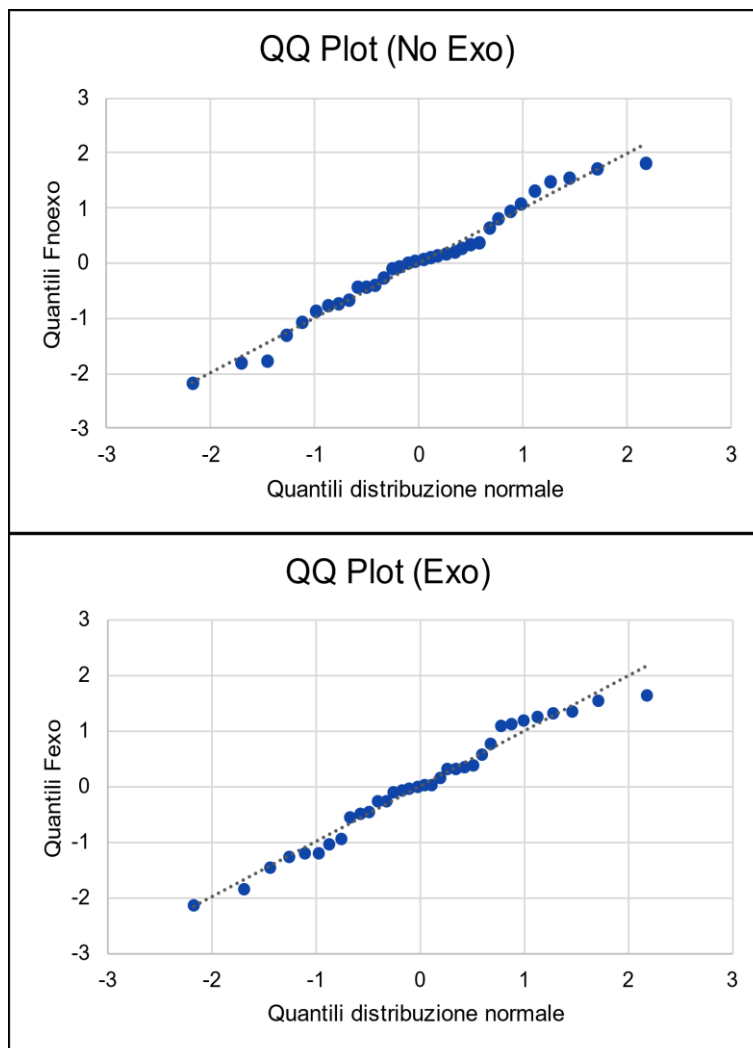


Figura 3.3. QQ Plot che vogliono descrivere la linearità e normalità delle misurazioni rilevate nelle prove di stacco massimale isometrico;

In sintesi, i risultati dello studio ci mostrano come l'utilizzo dell'esoscheletro Paexo Back (Ottobock SE & Co. KGaA, Duderstadt, Germania) abbia permesso ai partecipanti dello studio di esprimere in media una maggiore forza massima ($135,51 \pm 31,24$ kg vs $144,91 \pm 32,13$ kg, $p < 0,002$).

4. DISCUSSIONE

Gli obiettivi che si è posto questo studio sono stati quelli di valutare se l'utilizzo di un esoscheletro passivo, il Paexo Back (Ottobock SE & Co. KGaA, Duderstadt, Germania), da un lato, aumenti la forza massima erogata durante un test isometrico massimale in lavoratori che svolgono mansioni che prevedono movimentazione manuale dei carichi, e dall'altro, valutare la percezione degli utenti in termini di accettabilità, comfort o disagio percepito utilizzando lo strumento.

I risultati ottenuti e riportati nel capitolo precedente hanno dimostrato come l'utilizzo dell'esoscheletro Paexo Back abbia avuto un impatto positivo sulla forza dei partecipanti durante un compito che voleva simulare il movimento di sollevamento dei carichi, un'attività comune in numerosi settori lavorativi.

Il sollevamento di pesi, così come posture scorrette e movimenti ripetitivi sono compiti spesso responsabili dell'insorgenza di disturbi muscolo-scheletrici (DMS). I disturbi muscolo-scheletrici sono condizioni che coinvolgono muscoli, tendini, ossa o legamenti, causando dolore, rigidità o limitazioni funzionali.

L'uso di esoscheletri potrebbe essere una soluzione efficace per ridurre e prevenire questi disturbi, tutelando la salute dei lavoratori e fornendo un supporto mirato alle aree critiche del corpo coinvolte nelle attività lavorative. La distribuzione di questi dispositivi potrebbe costituire una risorsa preziosa per le aziende, in modo tale da garantire un ambiente lavorativo più produttivo, sicuro e confortevole [9] [32].

Durante le prove di stacco isometrico massimale, l'uso del dispositivo ha determinato un aumento delle prestazioni dei partecipanti rispetto alle prove senza esoscheletro.

Il miglioramento della forza massima tra le due condizioni è stato del 6,94% ($135,51 \pm 31,24$ kg vs $144,91 \pm 32,13$ kg, $p < 0,002$).

Il Paexo Back ha aiutato i soggetti fornendo principalmente supporto meccanico, facilitando il mantenimento di una postura corretta durante il sollevamento. Questo ha permesso di ridurre lo stress sui muscoli lombari ridistribuendo parte del carico ad altre aree come l'articolazione dell'anca e la muscolatura delle gambe.

La migliore postura e una sensazione di maggiore sicurezza, controllo e stabilità hanno contribuito positivamente alla prestazione, consentendo ai soggetti di lavorare in modo più

efficiente sviluppando una forza massimale più elevata e riducendo il rischio di potenziali infortuni e lesioni derivanti da postura scorrette.

In aggiunta all'aumento della forza muscolare massima, i partecipanti hanno riportato un minore sforzo durante l'esecuzione del compito di sollevamento quando indossavano il Paexo Back rispetto alla condizione senza l'esoscheletro.

L'esoscheletro ha agito assorbendo la forza durante la flessione e rilasciandola durante il sollevamento, contribuendo a migliorare l'efficienza muscolare e a ridurre la percezione di difficoltà nel compito [33].

Nonostante ciò, un certo grado di variabilità individuale è stato osservato nella risposta dei soggetti all'utilizzo dell'esoscheletro e tra i risultati delle prove (Exo; No Exo).

Per quanto riguarda le prove, i partecipanti hanno generalmente mostrato una prestazione migliore durante l'ultima delle tre esecuzioni, sia nella condizione con che senza esoscheletro. È importante sottolineare che non è stata condotta dai soggetti una specifica sessione di familiarizzazione con l'esoscheletro o con le attività sperimentali. Questa mancanza può aver influenzato la variabilità e il miglioramento osservato nei risultati dei test. Le ragioni di questa scelta sono stati molteplici e includono vincoli organizzativi e di tempo. La complessità nel coordinare i momenti di raccolta dati con gli impegni lavorativi dei partecipanti è emersa come una delle principali sfide. Il tempo limitato e le risorse disponibili non ci hanno consentito di organizzare una fase preliminare di adattamento e familiarizzazione dei partecipanti con l'uso dell'esoscheletro e con le attività richieste.

Per questo motivo si ritiene che una sessione di familiarizzazione avrebbe potuto mitigare la variabilità osservata nei risultati dei test e avrebbe potuto fornire un contesto più favorevole per valutare l'impatto delle variabili considerate [34] [35].

Fattori come le differenze antropometriche individuali, il livello di forza di base del partecipante e la sua condizione fisica, oltre che il livello di motivazione al compito e la percezione soggettiva del dispositivo di supporto indossato potrebbero aver influito sulla variabilità dei risultati.

Un altro fattore che potrebbe spiegare la variabilità nei risultati è la difficoltà riscontrata in alcuni partecipanti nell'adattare correttamente il Paexo Back. Questo causava movimenti della cintura lombare o addirittura spostamenti verso l'alto dell'intero dispositivo che impedivano all'esoscheletro di funzionare in modo perfettamente efficiente [36] [37].

Infatti, va sottolineato che, sebbene il dispositivo si sia dimostrato efficace nel migliorare la forza muscolare durante il compito specifico, alcuni partecipanti hanno evidenziato difficoltà nei movimenti mentre indossavano l'esoscheletro. Durante le richieste dinamiche, come ad esempio il piegamento per afferrare la sbarra prima della prova di stacco isometrico, i partecipanti hanno sperimentato resistenza aggiuntiva aumentando lo sforzo muscolare rispetto alla condizione senza l'esoscheletro. Di conseguenza, il beneficio fornito dal dispositivo è stato limitato a metà del movimento, ovvero la fase di sollevamento.

Questo suggerisce che Paexo Back e gli esoscheletri passivi per la schiena offrano dei vantaggi più significativi in contesti principalmente composti da compiti statici piuttosto che dinamici [21] [38] [39].

È un bene riconoscere questi limiti, poiché ciò aiuta a comprendere meglio le situazioni in cui questi dispositivi possono essere più vantaggiosi e dove potrebbero risultare meno utili. Le alternative potrebbero includere lo sviluppo di dispositivi più adatti a movimenti dinamici, ad esempio con regolazioni o design diversi per adattarsi meglio alle variazioni di movimento del corpo umano. Inoltre, potrebbe essere utile integrare l'uso dell'esoscheletro con specifici allenamenti o tecniche per migliorare l'adattamento dei soggetti all'uso di questi strumenti durante le attività dinamiche.

Quindi, anche se il dispositivo ha affermato la sua efficacia nel migliorare la forza muscolare dei partecipanti, prima di implementare Paexo Back negli stabilimenti e nelle strutture lavorative è essenziale che vengano considerate attentamente le caratteristiche specifiche del compito e delle attività lavorative coinvolte. Sicuramente però investire in tecnologie come gli esoscheletri può essere un passo significativo verso ambienti di lavoro più sicuri, confortevoli e sostenibili, riducendo l'incidenza dei disturbi muscolo-scheletrici e promuovendo il benessere dei lavoratori.

5. CONCLUSIONI

In conclusione, i risultati ottenuti da questo studio hanno permesso di constatare come, attraverso un protocollo di studio che prevedeva delle prove di stacco isometrico massimale, grazie all'utilizzo di Paexo Back (Ottobock SE & Co. KGaA, Duderstadt, Germania), i partecipanti siano riusciti a sviluppare una maggiore forza muscolare massima.

Il miglioramento della forza massima è stato del 6,94%, rispetto alle prove senza l'esoscheletro ($135,51 \pm 31,24$ kg vs $144,91 \pm 32,13$ kg, $p < 0,002$). Per valutare l'entità della differenza ottenuta abbiamo calcolato la variazione tra le misurazioni della forza massima nelle due condizioni e il risultato è stato di $9,41 \pm 16,5$ kg (Exo – NoExo).

Questi dati ci permettono di sottolineare l'efficacia del dispositivo di supporto per la schiena nell'ottimizzare le prestazioni durante le attività di sollevamento, offrendo un contributo significativo al miglioramento della forza.

La sperimentazione è stata effettuata su lavoratori che svolgono mansioni che richiedono movimentazione manuale dei carichi.

Quindi, questo studio ci ha permesso di constatare come l'implementazione di Paexo Back potrebbe essere un importante strumento per promuovere il benessere dei lavoratori, in particolare quelli che praticano attività di sollevamento. L'esoscheletro potrebbe migliorare l'ergonomia, la sicurezza e la produttività nei luoghi di lavoro favorendo una riduzione della percentuale di infortuni sul lavoro e prevenendo la comparsa di disturbi muscolo-scheletrici.

BIBLIOGRAFIA

- [1] [Online]. Available: <https://www.epicentro.iss.it/muscolo-scheletriche/>. [Consultato il giorno 13 Ottobre 2023].
- [2] A. Salvati, A. Brusco e C. , «Andamento degli infortuni sul lavoro e delle malattie professionali,» *Inail*, Gennaio 2023.
- [3] [Online]. Available: <http://sicurezzainpratica.eu/disturbi-muscolo-scheletrici/>. [Consultato il giorno 13 10 2023].
- [4] E. Badellino, A. Goggiamani, A. Ossicini e A. Papale, «I disturbi muscoloscheletrici lavorativi. La causa, l'insorgenza, la prevenzione, la tutela assicurativa.,» *Inail*, Roma, 2012.
- [5] [Online]. Available: <https://osha.europa.eu/en/campaigns-and-awards/healthy-workplaces-campaigns>. [Consultato il giorno 14 Ottobre 2023].
- [6] [Online]. Available: <https://osha.europa.eu/it/themes/musculoskeletal-disorders> . [Consultato il giorno 14 Ottobre 2023].
- [7] B. Chen, H. Ma, L. Y. Qin , F. Gao, K. M. Chan, S. M. Law, L. Qin e W. H. Liao, «Recent development and challenges of lower extremity exoskeletons,» *Journal of Orthopaedic Translation*, vol. 5, pp. 26-37, 2016.
- [8] Wikipedia, «Esoscheletro (tecnologia),» [Online]. Available: [https://it.wikipedia.org/wiki/Esoscheletro_\(tecnologia\)](https://it.wikipedia.org/wiki/Esoscheletro_(tecnologia)). [Consultato il giorno 7 Ottobre 2023].
- [9] T. Schmalz, A. Colienne, E. Bywater, L. Fritzsche, C. Gartner, M. Bellmann, S. Reimer e M. Ernst, «Un esoscheletro passivo con supporto per la schiena per uso manuale movimentazione dei materiali: riduzione del carico lombare e dello sforzo metabolico durante i sollevamenti ripetitivi,» *Transazioni IISE sull'ergonomia professionale e i fattori umani*, pp. 7-20, 2022.
- [10] Wikipedia, «Esoscheletro potenziato,» [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Powered_exoskeleton.. [Consultato il giorno 7 Ottobre 2023].

- [11] M. Di Costa, S. P. Pastorelli, L. Gastaldi, M. Sorli e M. Di Pardo, «Progettazione di componenti di attuazione per un'esoscheletro attivo industriale di supporto per la zona lombare,» Politecnico di Torino, 2018/2019.
- [12] P. J. Bartolo e B. Bibanda, *Bio-Materials and Prototyping Application in Medicine*, Springer, 2021.
- [13] C. J. Walsh, K. Endo e H. Herr, «A quasi-passive leg exoskeleton for load-carrying augmentation,» *International Journal of Humanoid Robotics*, vol. 4, n. 3, pp. 487-506, 2007.
- [14] [Online]. Available: <https://corporate.ottobock.com/en/company/newsroom/media-information/exoskeletons> e https://www.hwupgrade.it/news/scienza-tecnologia/dahyundai-l-esoscheletro-robotico-che-ricorda-la-tuta-di-iron-man_62674.html. [Consultato il giorno 15 Ottobre 2023].
- [15] [Online]. Available: <https://www.innovationpost.it/tecnologie/robotica/dalliit-e-linail-tre-esoscheletri-robotici-collaborativi-a-uso-industriale-per-ridurre-le-patologie-del-sistema-muscolo-scheletrico/> . [Consultato il giorno 14 Ottobre 2023].
- [16] Ottobock, «About Ottobock,» [Online]. Available: <https://corporate.ottobock.com/en/company/about-ottobock>. [Consultato il giorno 18 Ottobre 2023].
- [17] Ottobock, «Informazioni,» [Online]. Available: <https://corporate.ottobock.com/en/company/newsroom/media-information/exoskeletons>. [Consultato il giorno 18 Ottobre 2023].
- [18] Ottobock, «Tutorials Paexo Back,» [Online]. Available: <https://ottobockexoskeletons.com/paexo-back-tutorials/> . [Consultato il giorno 18 Ottobre 2023].
- [19] Ottobock, «Paexo Back,» [Online]. Available: <https://exoskeletonreport.com/product/paexo-back/> . [Consultato il giorno 18 Ottobre 2023].
- [20] S. b. Ottobock, «Youtube.com,» [Online]. Available: <https://youtu.be/TIqSr4sz5bY> . [Consultato il giorno 20 Ottobre 2023].

- [21] R. Govaerts, S. De Bock, S. Probyn, B. Vanderborght, B. Roelands, R. Meeusen e K. De Pauw, «L'impatto di un'esoscheletro posteriore industriale attivo e passivo su prestazione funzionale,» *Ergonomia*, pp. 1-22, 2023.
- [22] orthexo.de, «Paexo Back,» [Online]. Available: <https://orthexo.de/en/exoskeletons/industrial-exoskeletons/paexo-back/> . [Consultato il giorno 19 Ottobre 2023].
- [23] «Strumenti per la valutazione del paziente con demenza,» Regione Emilia Romagna, 2000.
- [24] F. A. S. I. Multiservizi, «MMSE,» [Online]. Available: <https://www.fondoasim.it/test-mini-mental-status-folstein/>. [Consultato il giorno 30 Ottobre 2023].
- [25] Wikipedia, «Nasa TLX,» [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/NASA-TLX>. [Consultato il giorno 30 Ottobre 2023].
- [26] F. E. Inc., «Baseline Hydraulic Hand Dynamometers,» [Online]. Available: <https://www.fab-ent.com/evaluation/strength/baseline-hydraulic-hand-dynamometers/>. [Consultato il giorno 2 11 2023].
- [27] D. M. Zubillaga, C. Rodriguez Fernandez, J. d. P. Fernandez, S. Arboleda Franco, L. Rodriguez Fernandez e F. Alonso Patino, «Valutazione della forza isometrica negli arti inferiori e della composizione corporea nei neonati prematuri,» *Anales de Pediatria*, vol. 83, n. 4, pp. 229-235, 2015.
- [28] Statology, «Effect size,» [Online]. Available: <https://www.statology.org/effect-size/>. [Consultato il giorno 4 Novembre 2023].
- [29] M. Mele, «Rapporto statistico relativo alla determinazione numerica degli animali previsti nel progetto di ricerca,» Pisa, 2019.
- [30] «Statology,» [Online]. Available: <https://www.statology.org/pearson-correlation-assumptions/>. [Consultato il giorno 4 Novembre 2023].
- [31] Statology, «QQ Plot,» [Online]. Available: <https://www.statology.org/q-q-plot-normality/>. [Consultato il giorno 4 Novembre 2023].
- [32] S. Spada, L. Ghibaud, S. Gilotta, L. Gastaldi e M. P. Cavatorta, «Investigation into the applicability of a passive upper-limb exoskeleton in automotive industry,» in *27th*

International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing,
Modena, 2017.

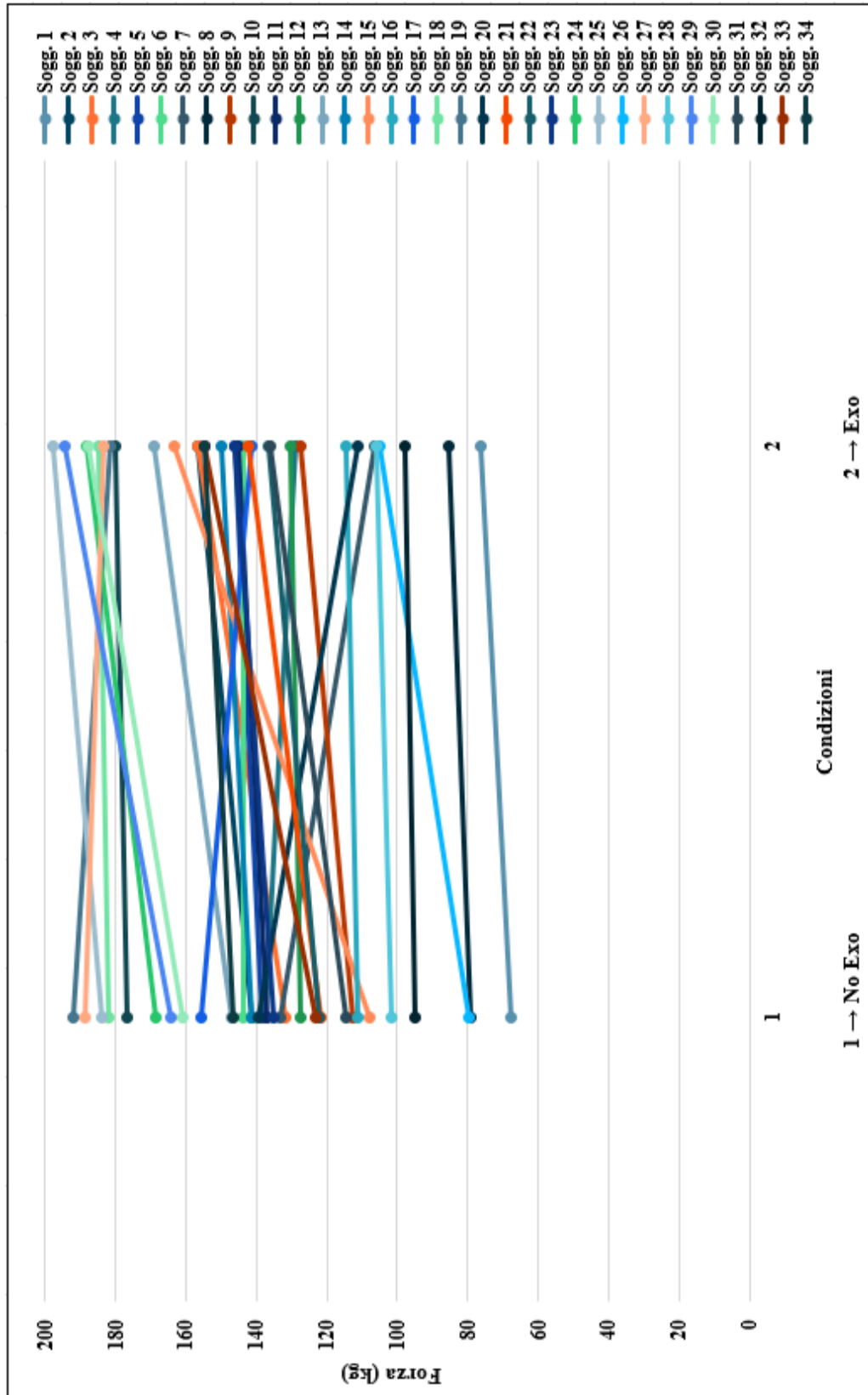
- [33] S. J. Baltrusch, J. H. Van Dieen , C. A. M. Van Bennekom e H. Houdijk, « “Effect of a Passive Trunk Exoskeleton on Functional Performance in Healthy Individuals,» *Applied Ergonomics*, n. 72, pp. 94-106, 2018.
- [34] R. M. Ritti-Dias, A. Avelar, E. Salvador e E. S. Cyrino, «Influence of previous experience on resistance training on reliability of one-repetition maximum test,» *Journal of strength and conditioning research*, vol. 25, n. 5, pp. 1418-1422, 2011.
- [35] J. L. Nuzzo, J. L. Taylor e S. C. Gandevia, «Measurement of upper and lower limb muscle strength and voluntary activation.,» *Journal of applied physiology (Bethesda, Md.:1985)*, vol. 126, n. 3, pp. 513-543, 2019.
- [36] T. Poliero, V. Fantil, M. Sposito, D. Caldwell e C. Natali, «Esoscheletri di supporto per la schiena attivi e passivi: un confronto tra attività statiche e dinamiche,» *Lettere IEEE di robotica e automazione*, vol. 7, n. 3, pp. 8463-8470, 2022.
- [37] S. Tossiri, M. B. Naf, M. Lazzaroni, J. Fernandez, M. Sposito, T. Poliero, L. Monica, S. Anastasi, D. G. Caldwell e J. Ortiz, «Esoscheletri di supporto per la schiena per uso professionale: una panoramica dei progressi e delle tendenze tecnologiche,» *Transazioni IISE sull'ergonomia professionale e i fattori umani*, vol. 7, n. 3-4, pp. 237-249, 2019.
- [38] K. Huysamen, M. De Looze, T. Bosch, G. Ortiz, S. Tossiri e L. W. O'Sullivan, «Valutazione di un esoscheletro industriale attivo per facilitare le attività di movimentazione manuale di sollevamento e abbassamento dinamico,» *Ergonomia applicata*, vol. 68, pp. 125-131, 2018.
- [39] L. Stirling, D. Kelty-Stephen, R. Finemann, M. L. Jones, B.-K. D. Park, M. P. Reed, G. Parham e H. J. Choi, «Adeguamento statico, dinamico e cognitivo degli esosistemi per l'operatore umano,» *Fattori umani*, vol. 62, n. 3, pp. 424-440, 2020.

APPENDICE

Allegato 1. Tabella di raccolta dati

Soggetto	Età	Altezza (cm)	Peso (kg)	MNSE (< 24)	Dx/Sx	Handgrip (kg)	Forza NO EXO			Forza EXO			Fexo-Fnoexo		
							1	2	3	BEST	1	2		3	BEST
1	20	177	70	30	dx	38	63,8	57,6	67,8	67,8	60,4	73,4	76,2	76,2	8,4
2	19	172	68	30	dx	43	107,1	118,8	141,2	141,2	136,2	154,8	156,8	156,8	15,6
3	25	170	81	30	dx	32	105,7	131,9	103,4	131,9	151,5	149,6	156,5	156,5	53,1
4	24	173	69	30	dx	31	110,4	122	137,3	137,3	129	121	123,8	129	-13,5
5	26	168	60	30	dx	37	108,5	122,2	138,2	138,2	134,1	135,4	146	146	7,8
6	27	171	69	30	dx	37	143,7	142,4	141,5	143,7	133	143,7	128,4	143,7	-13,1
7	27	175	78	30	dx	46	95,2	93,9	133,1	133,1	104,6	72,9	106,2	106,2	-26,9
8	26	170	59	30	dx	35	69,5	69,5	78,9	78,9	78,5	85,2	82,5	85,2	3,6
9	18	181	76	30	dx	48	97,6	91,9	112,4	112,4	123,6	122,3	127,3	127,3	14,9
10	27	182	80	30	dx	51	157,1	162,7	176,8	176,8	152,3	179,9	159,5	179,9	-17,3
11	25	185	70	30	dx	53	107,8	117,5	137	137	121,9	145	137,3	145	0,3
12	27	180	67,9	30	dx	41	109,7	127,4	114	127,4	118,3	125,7	130,1	130,1	16,1
13	26	194	81,65	30	dx	45	120,3	134,6	146,9	146,9	151,2	158,9	169	169	22,1
14	62	180	105	30	dx	33	141	125,7	141,3	141,3	144,2	149,8	149,5	149,8	8,2
15	36	187	102	30	dx	43	85	108	107,5	108	150,2	155,3	163,1	163,1	55,6
16	63	165	75,2	30	dx	39	92,8	103,3	111,4	111,4	95,2	99,6	114,4	114,4	3
17	56	169	77,2	30	dx	42	145,4	135	155,7	155,7	137,7	138,3	141,1	141,1	-14,6
18	31	170	81,7	30	dx	46	156,8	172,4	181,7	181,7	185	176,3	172,7	185	-9
19	32	187	101,9	30	dx	45	192	179,8	173	192	181,2	168,5	155,1	181,2	-17,9
20	23	175	71,2	30	dx	36	133,6	139,2	130,9	139,2	109,2	111,3	103,8	111,3	-27,1
21	24	181	71,9	30	dx	57	105,6	121,5	119,5	121,5	136,4	140,2	142,3	142,3	22,8
22	23	181	73,2	30	dx	33	115,9	122,3	113,1	122,3	127,4	136,6	132,1	136,6	19
23	25	177	62,5	30	dx	50	123,9	125,7	135,3	135,3	137,9	132,5	146,1	146,1	10,8
24	25	171	63,7	30	dx	56	168,7	166,7	144,6	168,7	172,1	188	177,7	188	33,1
25	29	188	93,4	30	dx	39	140,7	164,5	183,8	183,8	197,9	184,6	162,2	197,9	-21,6
26	26	197	92,2	30	dx	45	76	79,4	79,6	79,6	95,5	104,8	96	104,8	16,4
27	37	166,5	97,15	30	dx	37	173,9	188,5	172,7	188,5	183,4	160,4	160	183,4	-12,7
28	39	173	66,6	30	dx	40	79,6	101,7	100,4	101,7	103,9	102,1	106,1	106,1	5,7
29	30	192,5	97,1	30	dx	56	155,4	162,3	164,4	164,4	187,1	172,8	194,2	194,2	29,8
30	28	175	73,95	30	dx	46	130,3	159,7	160,8	160,8	170,9	178,9	187,6	187,6	26,8
31	26	165	56,9	30	dx	31	97	114,4	106,4	114,4	93,9	116,8	136	136	29,6
32	27	170,5	63,75	30	dx	23	94,8	80,7	93,2	94,8	89,2	96,7	97,9	97,9	4,7
33	25	174	66,25	30	dx	38	110,1	115,5	123,1	123,1	133	147,5	154,6	154,6	31,5
34	27	178	80	30	dx	40	146	140,3	146,4	146,4	146,6	142,9	154,7	154,7	8,3

Allegato 2. Scatterplot tra la migliore prova eseguita da ogni partecipante con e senza esoscheletro

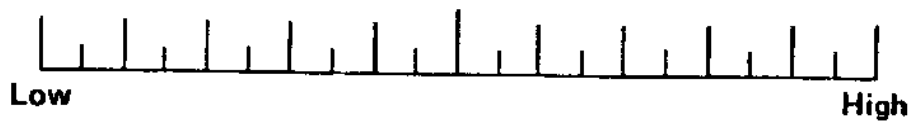


Allegato 3. NASA-TLX somministrato ai partecipanti riguardo l'esperienza avuta con l'esoscheletro

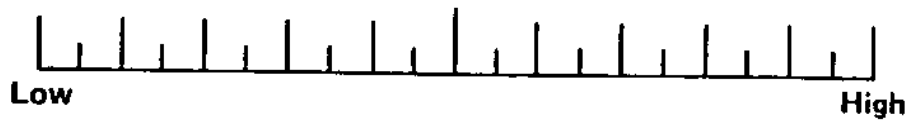
Subject ID: _____ **Task ID:** _____

RATING SHEET

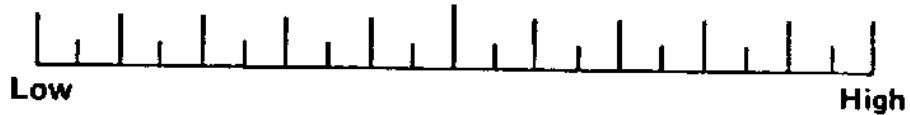
MENTAL DEMAND



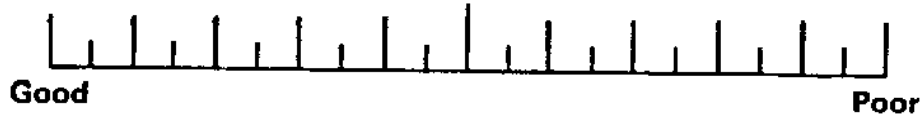
PHYSICAL DEMAND



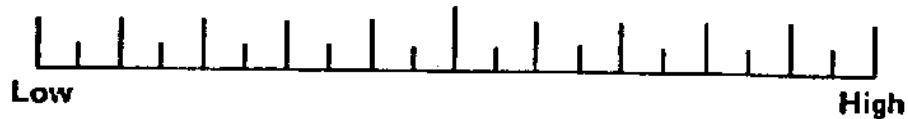
TEMPORAL DEMAND



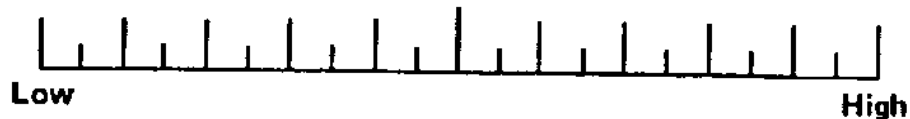
PERFORMANCE

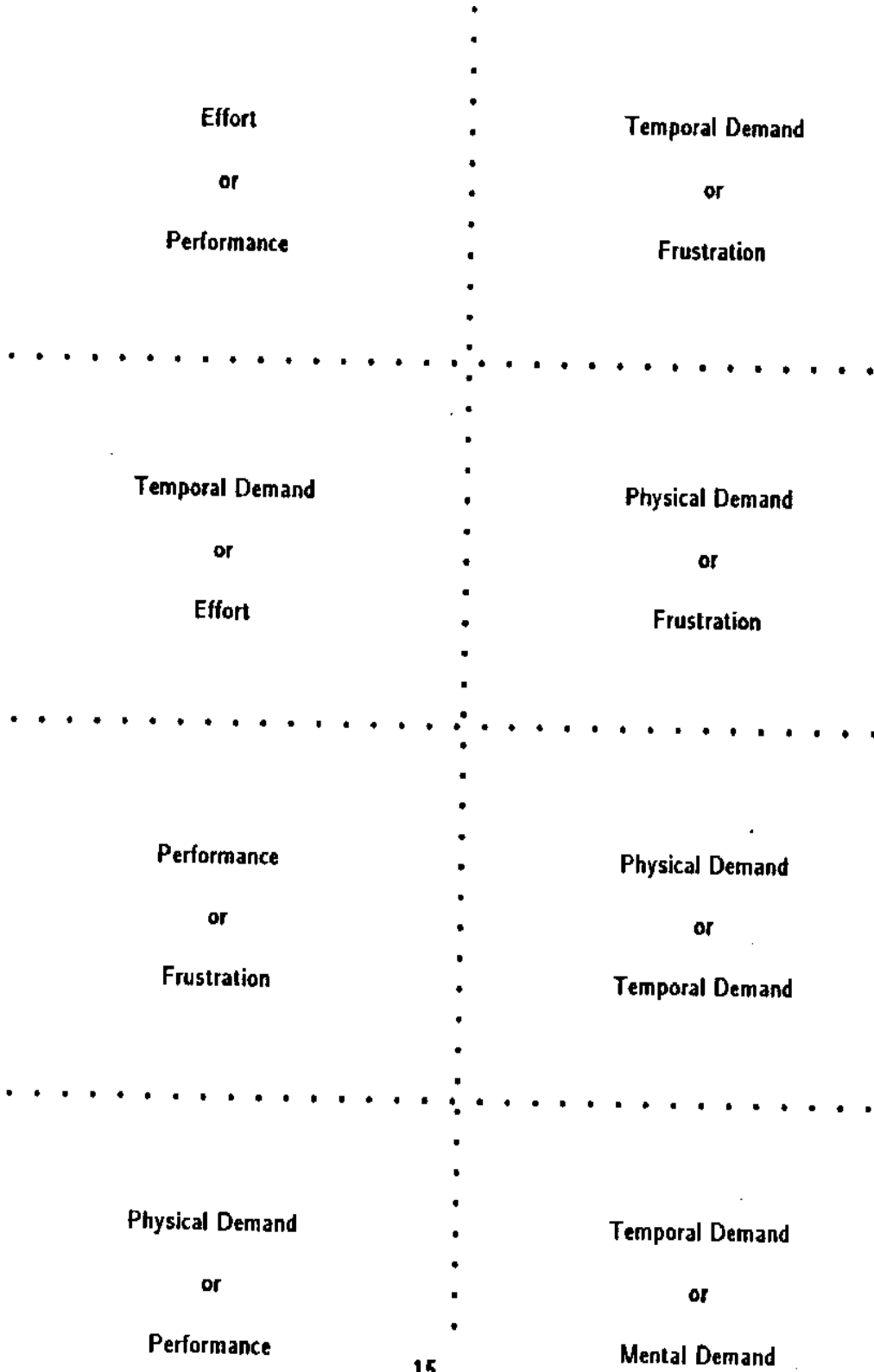


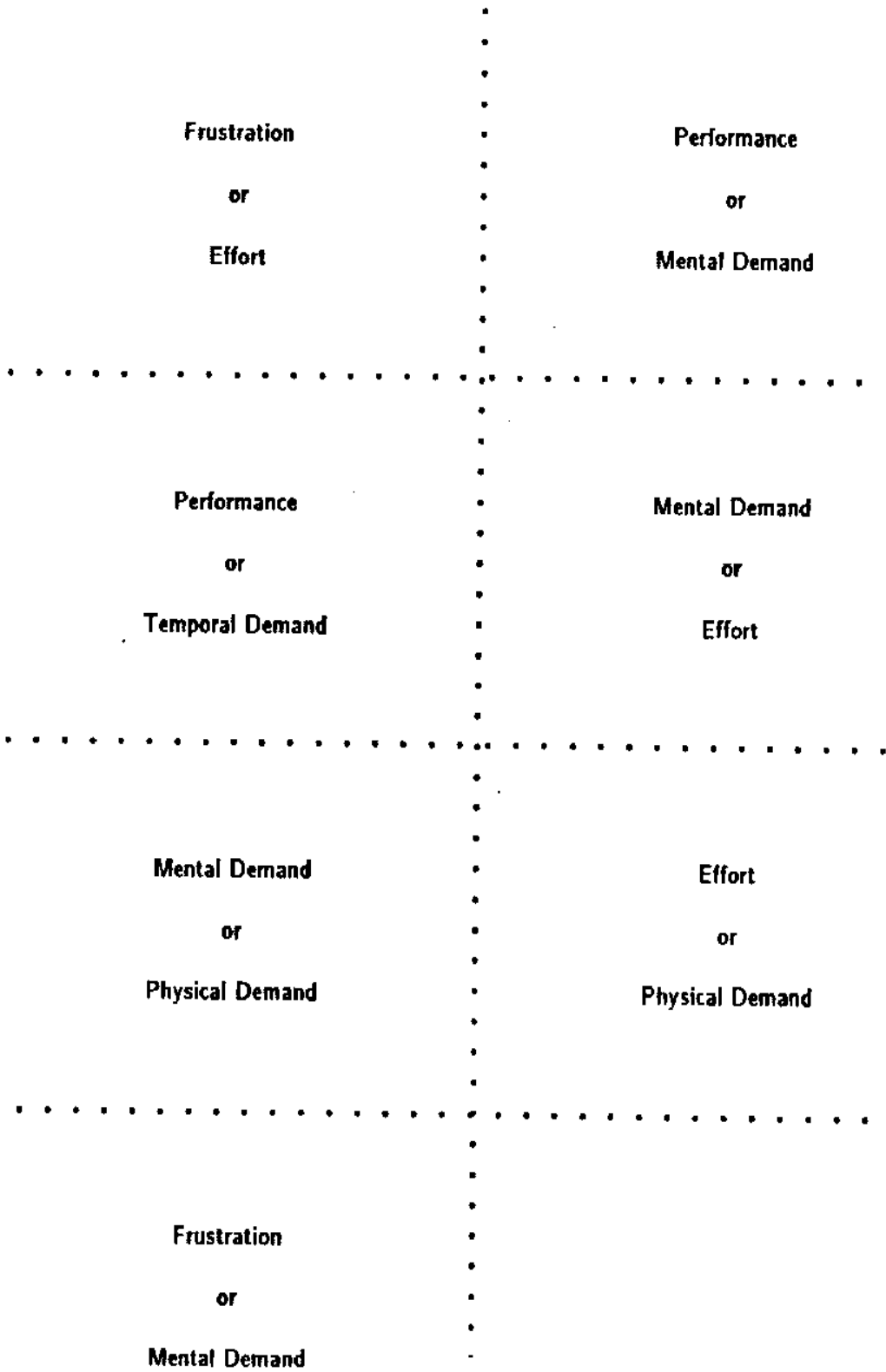
EFFORT



FRUSTRATION







Allegato 4. Questionario sul comfort di Paexo Back somministrato ai lavoratori alla fine della sperimentazione

Dopo la tua esperienza con Ottobock Paexo, come valuti l'esoscheletro dal punto di vista del comfort? *						
	1	2	3	4	5	
Per niente comodo	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Molto comodo

Quanto pensi che l'esoscheletro possa averti aiutato durante le prove di stacco isometrico a livello di supporto e di forza muscolare? *						
	1	2	3	4	5	
Poco	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Molto

Quanto ritieni che sia diminuito lo sforzo e quindi la stanchezza utilizzando l'esoscheletro? *						
	1	2	3	4	5	
Poco	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Molto

Dal punto di vista della vestibilità, pensi che indossare l'esoscheletro Ottobock Paexo in maniera autonoma per te possa essere... *						
	1	2	3	4	5	
Molto semplice	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Molto difficile

Se avessi a disposizione l'esoscheletro Ottobock Paexo nel tuo luogo di lavoro, quando e quanto lo utilizzeresti? *

- Sempre
- Solo quando devo alzare carichi pesanti
- Quando mi sento più stanco
- Non lo utilizzerei
- Altro

Quanto ritieni possa essere sicuro l'utilizzo dell'esoscheletro nel tuo ambiente di lavoro? *

	1	2	3	4	5	
Poco	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Molto