



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale

**SPERIMENTAZIONE E VALUTAZIONE DI ESOSCHELETRI:
PERFORMANCE ERGONOMICA E PERCEZIONE DELL'UTENTE**

**TESTING AND EVALUATION OF EXOSKELETONS:
ERGONOMIC PERFORMANCE AND USER PERCEPTION**

Relatore:
Prof.ssa Papetti Alessandra

Tesi di Laurea di:
Giorgio Cardoni

Correlatore:
Ing. Ciccarelli Marianna

Anno Accademico 2023 / 2024

Indice

Introduzione	3
Capitolo 1 - Metodologia, Test e Raccolta Dati.....	6
1.1 Gli esoscheletri	6
1.2 La sensoristica	9
1.3 Il metodo REBA	14
1.4 Il metodo RULA.....	16
1.5 Applicazione automatizzata del metodo REBA e RULA	18
1.6 I questionari	19
1.6.1 Questionari di familiarizzazione	19
1.6.2 Questionari intermedi	20
1.6.3 Questionari finali	21
1.7 I test	23
1.7.1 Fase di familiarizzazione	23
1.7.2 Test per gli esoscheletri a supporto delle spalle	24
1.7.3 Test per gli esoscheletri a supporto della schiena.....	27
1.8 Gli utenti che hanno eseguito i test	31
1.9 Esecuzione dei test e raccolta dati	36
1.9.1 Procedura iniziale	36
1.9.2 Fase di familiarizzazione	37
1.9.3 Preparazione e calibrazione dei sensori	37
1.9.4 Esecuzione dei test.....	39
1.9.5 Transizione tra i test.....	40
1.9.6 Monitoraggio delle impressioni degli utenti.....	41
1.9.7 Conclusione della sessione	41
Capitolo 2 - Analisi Posturale	42
2.1 Preparazione dei dati per l'analisi	42
2.1.1 Esportazione dei dati di XSens	43
2.1.2 Revisione delle registrazioni.....	44
2.1.3 Inserimento dei dati in RULAer	45
2.1.4 Aggregazione dei risultati	46

2.2 Analisi descrittiva.....	46
2.2.1 Analisi descrittiva con i risultati REBA	47
2.2.2 Analisi descrittiva con i risultati RULA	55
2.3 Analisi statistica	62
2.3.1 Protocollo per l'analisi statistica posturale	63
2.3.2 Risultati dell'analisi statistica posturale	66
Capitolo 3 - Analisi dei questionari	73
3.1 Preparazione dei dati per l'analisi	73
3.2 Analisi descrittiva.....	77
3.2.1 Analisi dello sforzo percepito attraverso la scala di Borg	78
3.2.2 Analisi della fatica media e della variazione di fatica	83
3.2.3 Analisi User Experience Questionnaire (UEQ)	85
3.2.4 Analisi User Experience (UX).....	87
3.3 Analisi statistica	89
3.3.1 Protocollo per l'analisi statistica dei questionari	89
3.3.2 Risultati dell'analisi statistica dei questionari	90
3.3.2.1 Risultati dell'analisi di sforzo e fatica.....	90
3.3.2.2 Risultati dell'analisi dei punteggi medi di UEQ MEDIO e UX MEDIO.....	104
Capitolo 4 - Analisi dell'attivazione muscolare.....	105
Conclusione.....	109
Bibliografia	111
Ringraziamenti	112

Introduzione

Negli ultimi anni, il concetto di Industria 5.0 ha assunto un ruolo sempre più importante nell'evoluzione del settore manifatturiero e logistico. Rispetto alla precedente rivoluzione Industriale 4.0, che ha posto l'attenzione sull'automazione e sulla connettività digitale, l'Industria 5.0 si basa sulla centralità dell'essere umano nel processo produttivo, adottando un approccio innovativo noto come "Human-Centered Manufacturing".

Questo nuovo paradigma implica che non sia più l'uomo a doversi adattare alle macchine e agli strumenti di lavoro, ma che sia l'ambiente in cui opera ad essere stato pensato, studiato e realizzato su misura del lavoratore. Questo obiettivo può essere raggiunto integrando tecnologie avanzate con l'intelligenza e le capacità umane, in modo che il lavoratore può dedicarsi e concentrarsi alle attività a valore aggiunto e che le tecnologie siano di supporto e non di sostituzione all'uomo. Inoltre, fondamentale è che la progettazione degli ambienti di lavoro migliori la sicurezza, la salute e l'efficienza dei lavoratori, riducendo al contempo i rischi legati alle attività lavorative.

Uno dei problemi più rilevanti nel contesto lavorativo è rappresentato dai disturbi muscoloscheletrici (DMS), causati da posture incongrue, movimenti ripetitivi e sforzi eccessivi. Questi disturbi, se non adeguatamente gestiti, possono influire negativamente sulla salute dei lavoratori, compromettendone il benessere e la produttività.

Per ridurre tali rischi, assume un ruolo fondamentale l'ergonomia, la disciplina che studia l'interazione tra l'uomo e il suo ambiente di lavoro con l'obiettivo di migliorare le condizioni operative e prevenire infortuni.

In questo contesto, gli esoscheletri rappresentano una soluzione innovativa per supportare i lavoratori nelle attività fisicamente impegnative. Questi dispositivi, progettati per ridurre il carico biomeccanico sono sempre più utilizzati in diversi settori industriali. Tuttavia, è fondamentale valutarne in modo rigoroso l'efficacia nei vari campi di utilizzo, identificando eventuali variabili che possano influire sui risultati.

L'obiettivo principale di questa tesi di laurea è valutare l'efficacia e il comfort degli esoscheletri passivi, ponendo particolare attenzione all'aspetto ergonomico e verificando se tali dispositivi possano migliorare l'ergonomia nelle mansioni lavorative.

In particolare, si vuole valutare:

- L'impatto degli esoscheletri sull'ergonomia posturale, attraverso i metodi di valutazione REBA e RULA.
- La percezione soggettiva degli utenti, valutando lo sforzo percepito, la fatica e l'esperienza d'uso attraverso questionari.
- L'attivazione muscolare durante l'utilizzo degli esoscheletri, valutata mediante elettromiografi.

Questa valutazione si è divisa in due fasi, una di test degli esoscheletri e una seconda di elaborazione dei dati raccolti durante i test. Entrambe le fasi si sono svolte presso l'Università Politecnica delle Marche, all'interno del Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche (DIISM).

La tesi si divide in quattro capitoli principali, ciascuno dedicato a una fase specifica della valutazione.

Nel primo capitolo viene descritta la fase iniziale, con focus sulla metodologia seguita per la progettazione e l'esecuzione dei test. Vengono analizzati i dettagli degli esoscheletri testati, le caratteristiche del campione di utenti, il protocollo sperimentale, la sensoristica utilizzata e le modalità di raccolta dati.

Nel secondo capitolo sono descritti i risultati dell'analisi posturale, a partire dalla preparazione e elaborazione dei dati raccolti durante i test. In particolare, vengono presentati i risultati ottenuti dall'analisi descrittiva dei dati e successivamente descritta l'analisi statistica eseguita per confrontare e interpretare i risultati.

Nel terzo capitolo viene effettuata l'analisi dei questionari, con focus iniziale sulla procedura di unione dei vari dati provenienti dai questionari compilati dai partecipanti. Successivamente, sono mostrati i risultati dell'analisi descrittiva condotta sui dati raccolti e, infine, sono presentati la procedura e i risultati dell'analisi statistica.

Nel quarto capitolo vengono presentati i risultati ottenuti dall'analisi dei dati degli elettromiografi, che permettono di valutare l'attivazione muscolare.

Le conclusioni forniscono una sintesi delle evidenze emerse dalla valutazione, evidenziando gli aspetti positivi e i limiti degli esoscheletri testati.

Durante tutta la valutazione vengono riportati i grafici, che illustrano i risultati chiave, e una descrizione approfondita del processo di elaborazione dati, al fine di rendere i risultati facilmente interpretabili.

Capitolo 1

Metodologia, Test e Raccolta Dati

Il capitolo si apre con una presentazione degli esoscheletri testati, descrivendone le caratteristiche e le modalità d'uso.

Successivamente, vengono illustrati la sensoristica impiegata, i metodi di analisi ergonomica REBA e RULA, i questionari somministrati, il protocollo di test, le caratteristiche del campione di utenti e le modalità di raccolta dati.

1.1 Gli esoscheletri

Gli esoscheletri per definizione sono dei dispositivi progettati per supportare, potenziare e assistere i movimenti del corpo umano, con lo scopo di ridurre lo sforzo fisico e le posture inadeguate durante le attività lavorative.

Possono essere classificati in due categorie principali:

- esoscheletri attivi: che utilizzano attuatori o motori per generare forza
- esoscheletri passivi: che sfruttano meccanismi meccanici come molle, leve o elastici per ridistribuire il carico senza l'uso di energia esterna

In questa valutazione, sono stati testati quattro diversi esoscheletri passivi di due aziende del settore: Ottobock e Comau.

In particolare, sono stati testati questi modelli:

- **Ottobock Paexo Back**

Progettato per supportare la schiena nelle attività di sollevamento, con il funzionamento di assorbire la forza durante i piegamenti e rilasciandola durante il sollevamento rendendo il carico più facile da trasportare. In questo modo il carico viene prelevato dalla spalla e trasferito alle cosce.

- **Ottobock Paexo Shoulder**

Progettato per supportare le spalle nelle attività sopraelevate, in cui l'operatore deve sollevare o mantenere prolungatamente le braccia sopra la testa.

Il meccanismo a molla ha lo scopo di deviare il carico verso il tronco, migliorando il comfort degli utenti e riducendo l'affaticamento muscolare nelle articolazioni superiori.

- **Comau MATE-XB**

Anche questo esoscheletro è stato progettato per supportare la schiena. Il funzionamento è simile al modello Ottobock Paexo Back, ma con alcune differenze strutturali.



Figura 1 - Comau MATE-XB

- **Comau MATE-XT**

Anche questo esoscheletro è stato progettato per supportare le spalle. Si differenzia dal modello dell'azienda Ottobock, per il suo design più compatto.



Figura 2 - Comau MATE-XT

É importante ricordare che l'obiettivo di questa valutazione non è tanto di valutare le differenze tra questi modelli stabilendo il migliore in termini di comfort o efficacia, ma di concentrarsi sul comfort e sull'efficacia del dispositivo esoscheletro nelle attività lavorative in cui può essere applicato.

1.2 La sensoristica

Durante i test, sono stati utilizzati diversi strumenti di acquisizione dati per monitorare le prestazioni ergonomiche, i movimenti e l'attività muscolare degli utenti.

La combinazione di sensori ha garantito una raccolta completa e dettagliata delle informazioni necessarie per l'analisi.

Nei vari test sono stati utilizzati i seguenti strumenti:

- **XSens**

Il software e gli hardware di XSens della azienda Movella sono stati utilizzati per la cattura del movimento. Attraverso tutti i 17 sensori inerziali (IMU) che sono stati posizionati in tutte le aree richieste dal sistema è stato possibile ricreare un modello virtuale dell'utente e replicare il movimento delle principali articolazioni e segmenti corporei.



Figura 3 - Sensore inerziale di XSens

Grazie a questo sistema è stato possibile analizzare ed estrapolare i dati necessari per l'analisi ergonomica nei test dinamici e statici svolti.

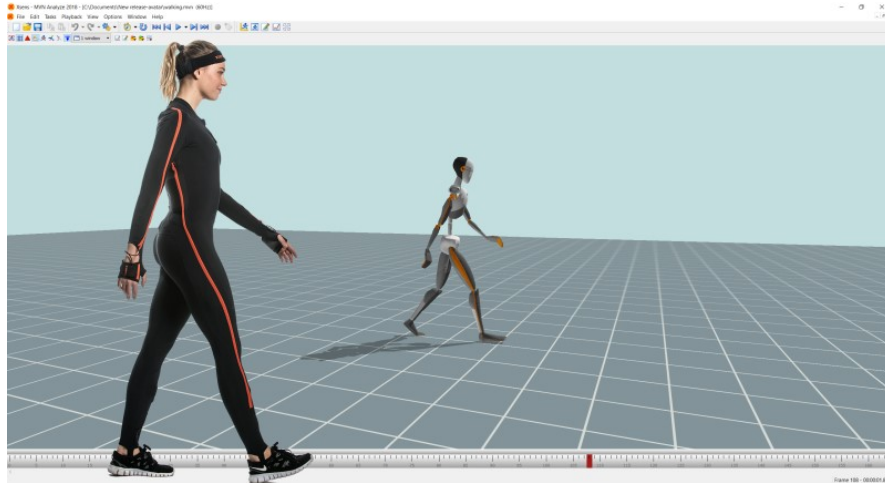


Figura 4 - Dimostrazione della cattura del movimento tramite XSens

- **Elettromiografi FREEMG**

Gli elettromiografi della BTS Bioengineering sono stati utilizzati per monitorare l'attività elettrica dei muscoli, consentendo di valutare l'attivazione muscolare in tutte le fasi dei test.

Grazie a questi sensori si potrà analizzare lo sforzo oggettivo dell'utente durante il test e confrontare lo sforzo con e senza esoscheletro.



Figura 5 - Elettromiografi FREEMG

- **Smartwatch**

Durante i vari test è stato utilizzato anche uno smartwatch per il monitoraggio dell'empatica.

Questo dispositivo ha permesso di raccogliere i dati fisiologici dell'utente, come il livello di stress e l'attività galvanica della pelle, fornendo un indicatore del coinvolgimento emotivo durante i test.

- **Videocamera**

Una videocamera è stata utilizzata per registrare ogni test. Le registrazioni sono state di supporto nella fase di analisi per poter verificare eventuali risultati.

- **Cronometro**

Un cronometro è stato utilizzato per misurare la durata di ogni test, assicurando il rispetto del protocollo.

Oltre all'importanza degli strumenti utilizzati, la precisione dei dati raccolti dipendeva anche dal posizionamento di quest'ultimi.

Per questo motivo si poneva molta attenzione nella fase di preparazione e applicazione dei sensori, la quale impegnava grand parte del tempo di test.

I 17 sensori di Xsens, tramite apposite fasce, magliette e guanti, venivano così applicati:

HEAD	dietro la testa
SHOU R	nella spalla destra
SHOU L	nella spalla sinistra
STERN	nello sterno
uARM R	nel braccio destro
fARM R	nell'avambraccio destro
HAND R	nella mano destra
uARM L	nel braccio sinistro
fARM L	nell'avambraccio sinistro
HAND L	nella mano sinistra
PELV	nella parte lombare
uLEG R	nella coscia destra
ILEG R	nella gamba destra
FOOT R	nel piede destro
uLEG L	nella coscia sinistra
ILEG L	nella gamba sinistra
FOOT L	nel piede sinistro



Figura 6 - Fasce, magliette e guanti utilizzati per applicare i sensori Xsens

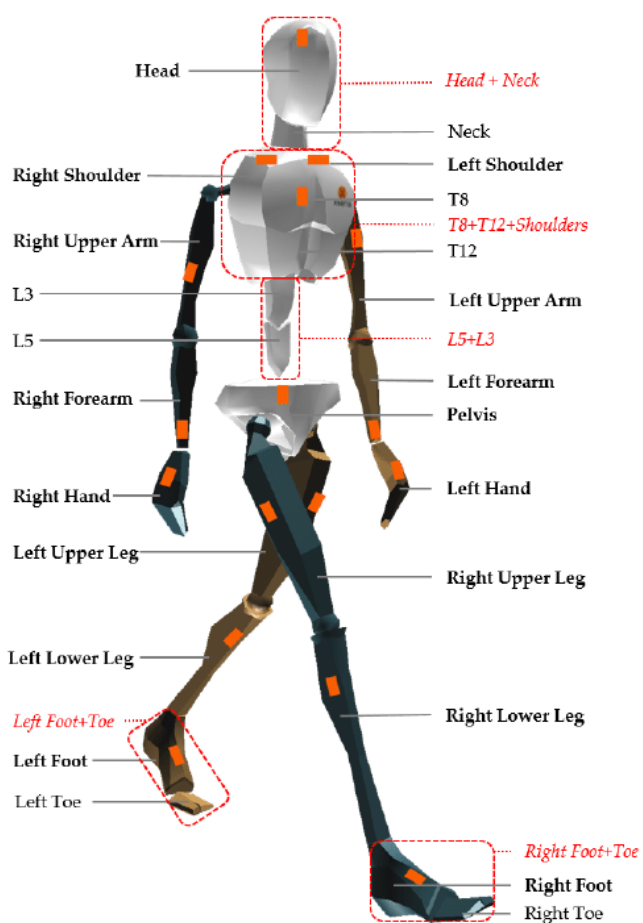


Figura 7 - Posizionamento dei 17 sensori di Xsens sulle relative parti del corpo

Grazie alla loro posizione, il software era in grado di replicare virtualmente il movimento dell'utente e ricavarsi gli angoli relativi delle principali articolazioni che hanno permesso di effettuare una analisi ergonomica.

Per quanto riguarda invece gli elettromiografi FREEEMG, questi venivano posizionati a pelle in diverse posizioni in base alla tipologia di test.

Per i test sulle spalle, gli elettrodi sono stati posizionati sui muscoli:

- schiena: rector spinae
- spalle: deltoide mediale e anteriore
- collo: trapezio

Invece, per i test sulla schiena, gli elettrodi sono stati posizionati sui muscoli:

- schiena: rector spinae longissimus
- braccia: bicipite
- gambe: quadricipite e semitendinoso

Lo smartwatch veniva posizionato sulla mano non dominante per evitare interferenze con le attività di test e garantire un'acquisizione stabile dei dati.

1.3 Il metodo REBA

Il metodo REBA (Rapid Entire Body Assessment) è stato sviluppato da McAtamney e Corlett della università di Nottingham nel 1993.

È uno strumento di analisi ergonomica che considera i requisiti di carico biomeccanico e posturali delle attività lavorative su collo, tronco, arti superiori e arti inferiori.

Utilizza un approccio sistematico per la valutazione della postura, della forza e della ripetitività dei movimenti associate alla specifica mansione lavorativa oggetto di valutazione.

Il metodo si basa sull'assegnazione di punteggi alle diverse parti del corpo in base alla postura assunta durante l'attività, considerando:

- posizione del collo: inclinazione e rotazione della testa
- posizione del tronco: inclinazione, flessione o torsione del busto
- posizione degli arti inferiori: flessione delle ginocchia e stabilità del supporto
- posizione degli arti superiori: movimenti di spalle, gomiti e polsi
- forze applicate: peso del carico sollevato o trasportato
- movimenti ripetitivi: frequenza e durata dei task

Gli step richiesti per il REBA sono:

- osservazione: si selezionano istantanee rappresentative della postura assunta durante l'attività
- assegnazione dei punteggi: si assegnano valori a ciascuna parte del corpo in base alle tabelle fornite dal metodo
- calcolo del punteggio totale: i valori delle diverse sezioni vengono combinati in base a un modello predefinito, ottenendo un punteggio complessivo di rischio ergonomico
- classificazione del rischio: il punteggio totale viene tradotto in cinque livelli di rischio, da basso (intervento non necessario) a molto alto (intervento immediato richiesto)

Rapid Entire Body Assessment

Observer: _____ Date: _____

Comparator: _____

A. Neck/Torso/Arm Analysis

Step 1. Neck/Torso/Arm Posture

Neck Score: _____

Trunk Score: _____

Arm Score: _____

B. Arm/Wrist Analysis

Step 2. Locate Upper Arm Posture

Step 3. Locate Lower Arm Posture

Step 4. Locate Wrist Posture

Step 5. Add Coupling Score

Step 6. Locate & Read Column in Table C

Step 7. Activity Score

Table A

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Neck	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Trunk	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Arm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Table B

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Neck	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Trunk	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Arm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Table C

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Neck	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Trunk	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Arm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Table D

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Neck	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Trunk	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Arm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Table E

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Neck	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Trunk	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Arm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Table F

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Neck	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Trunk	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Arm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Table G

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Neck	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Trunk	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Arm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Table H

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Neck	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Trunk	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Arm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Table I

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Neck	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Trunk	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Arm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Table J

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Neck	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Trunk	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Arm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Table K

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Neck	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Trunk	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Arm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Table L

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Neck	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Trunk	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Arm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Table M

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Neck	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Trunk	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Arm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Table N

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Neck	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Trunk	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Arm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Table O

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Neck	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Trunk	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Arm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Table P

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Neck	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Trunk	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Arm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Table Q

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Neck	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Trunk	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Arm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Table R

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Neck	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Trunk	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Arm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Table S

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Neck	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Trunk	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Arm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Table T

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Neck	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Trunk	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Arm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Table U

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Neck	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Trunk	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Arm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Table V

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Neck	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Trunk	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Arm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Table W

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Neck	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Trunk	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Arm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Table X

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Neck	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Trunk	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Arm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Table Y

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Neck	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Trunk	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Arm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Table Z

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Neck	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Trunk	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Arm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Table AA

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Neck	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Trunk	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Arm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Table AB

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Neck	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Trunk	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Arm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Table AC

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Neck	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Trunk	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Arm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Table AD

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Neck	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Trunk	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Arm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Table AE

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Neck	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Trunk	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Arm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Table AF

	1	2	3
--	---	---	---

Per queste caratteristiche, questo metodo è stato impiegato per analizzare i test eseguiti con gli esoscheletri a supporto della schiena. In particolare, questa scelta è dovuta al fatto che il metodo REBA, a differenza del metodo RULA, considera nell'analisi ergonomica anche gli arti inferiori.

1.4 Il metodo RULA

Anche il metodo RULA (Rapid Upper Limb Assessment) è stato sviluppato da McAtamney e Corlett della università di Nottingham nel 1993.

Questo metodo si differenzia dal REBA dal fatto che non considera nell'analisi ergonomica gli arti inferiori, concentrandosi sulle posture degli arti superiori.

Come per il REBA, il RULA assegna dei punteggi ai segmenti superiori del corpo, analizzando:

- posizione delle braccia: angolo di flessione, estensione o abduzione delle spalle
- posizione degli avambracci: angolo di flessione o estensione
- movimenti del polso: flessione, estensione o deviazione laterale
- posizione del collo: inclinazione o rotazione della testa
- movimenti del tronco: flessione, torsione o inclinazione del busto
- forze applicate: carichi manipolati o pesi sostenuti

Gli step richiesti dal RULA sono:

- osservazione: si selezionano istantanee rappresentative della postura assunta durante l'attività
- attribuzione dei punteggi: ogni segmento corporeo viene valutato in base a scale di riferimento predefinite
- calcolo del punteggio totale: i valori vengono combinati in base a tabelle standard, generando un punteggio complessivo di rischio posturale
- classificazione del rischio: i punteggi vengono suddivisi in quattro livelli di rischio, dal minimo (nessuna azione richiesta) al massimo (intervento immediato necessario)

Rapid Upper Limb Assessment

Evaluation Date: _____ Shift: _____

Company Workstation / Task Worker: _____

A. Arm and Wrist Analysis
 Step 1. Locate Upper Arm Position
 +1 -2 -3 -4 -5
 Step 1a. Adjust...
 (If shoulder is raised) +1
 (If upper arm is above head) +1
 (If arm is supported or person is leaning) -1
 Step 2. Locate Lower Arm Position:
 +1 -2 -3 -4 -5
 Step 2a. Adjust...
 (If both arms are working across midline or out to side of body) +1
 Step 3. Locate Wrist Position:
 +1 -2 -3 -4 -5
 Step 3a. Adjust...
 (If wrist is bent from midline) Add +1
 Step 4. Wrist Twist:
 (If wrist is twisted to right range) +1
 (If wrist is at or near end of range) +2
 Step 5. Look-up Posture Score in Table A:
 Using values from steps 1-4 above, locate score in Table A:
 Step 6. Add Muscle Use Score:
 (If person is working steadily for 15 minutes) +1
 (If action requires exertion 40% per minute) +1
 Step 7. Add Force/Load Score:
 (If load < 2 kg (4.4 lb) or intermittent) +0
 (If load < 2.5 kg (5.5 lb) or intermittent) +1
 (If load < 3 kg (6.6 lb) or intermittent or repetitive) +2
 (If more than 3 kg or repetitive or steady) +3
 Step 8. Find Row in Table C:
 Add values from steps 6-7 to table C:
 Wrist and Arm Score: Find row in Table C.

B. Neck, Trunk and Leg Analysis
 Step 9. Locate Neck Position:
 +1 -2 -3 -4 -5
 Step 9a. Adjust...
 (If neck is twisted) +1
 (If neck is side bent) +1
 Step 10. Locate Trunk Position:
 +1 -2 -3 -4 -5
 Step 10a. Adjust...
 (If trunk is twisted) +1
 (If trunk is side bent) +1
 Step 11. Legs:
 (If legs and feet are supported) -1
 (If not) -2
 Step 12. Look-up Posture Score in Table B:
 Using values from steps 9-11 above, locate score in Table B:
 Step 13. Add Muscle Use Score:
 (If person is working steadily for 15 minutes) +1
 (If action requires exertion 40% per minute) +1
 Step 14. Add Force/Load Score:
 (If load < 2 kg (4.4 lb) or intermittent) +0
 (If load < 2.5 kg (5.5 lb) or intermittent) +1
 (If load < 3 kg (6.6 lb) or intermittent or repetitive) +2
 (If more than 3 kg or repetitive or steady) +3
 Step 15. Find Column in Table C:
 Add values from steps 13-14 to table C:
 Neck, Trunk and Leg Score: Find column in Table C.

Table A: Wrist Score

Upper Arm	Wrist	Wrist	Wrist	Wrist	Wrist	Wrist	Wrist
1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	2	3	4	5	6	7
2	2	3	4	5	6	7	8
3	3	4	5	6	7	8	9
4	4	5	6	7	8	9	10
5	5	6	7	8	9	10	11
6	6	7	8	9	10	11	12
7	7	8	9	10	11	12	13
8	8	9	10	11	12	13	14

Table B: Trunk Posture Score

Neck	Trunk	Legs	Neck	Trunk	Legs	Neck	Trunk	Legs
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	2	3	4	5	6	7	8
2	2	3	4	5	6	7	8	9
3	3	4	5	6	7	8	9	10
4	4	5	6	7	8	9	10	11
5	5	6	7	8	9	10	11	12
6	6	7	8	9	10	11	12	13
7	7	8	9	10	11	12	13	14
8	8	9	10	11	12	13	14	15
9	9	10	11	12	13	14	15	16

Table C: RULA Score

Wrist / Arm Score	Neck, Trunk and Leg Score	Wrist / Arm Score	Neck, Trunk and Leg Score	Wrist / Arm Score	Neck, Trunk and Leg Score	Wrist / Arm Score	Neck, Trunk and Leg Score
1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	2	3	4	5	6	7
2	2	3	4	5	6	7	8
3	3	4	5	6	7	8	9
4	4	5	6	7	8	9	10
5	5	6	7	8	9	10	11
6	6	7	8	9	10	11	12
7	7	8	9	10	11	12	13
8	8	9	10	11	12	13	14
9	9	10	11	12	13	14	15
10	10	11	12	13	14	15	16
11	11	12	13	14	15	16	17
12	12	13	14	15	16	17	18
13	13	14	15	16	17	18	19
14	14	15	16	17	18	19	20
15	15	16	17	18	19	20	21
16	16	17	18	19	20	21	22
17	17	18	19	20	21	22	23
18	18	19	20	21	22	23	24
19	19	20	21	22	23	24	25
20	20	21	22	23	24	25	26

Scoring: Find score from Table C:
 1-2 Acceptable posture
 3-4 Further investigation, change may be needed
 5-6 Further investigation, change may be needed
 7-8 Investigate and implement change

RULA Score

Left: _____ Right: _____

Force / Load Score: _____

Wrist & Arm Score: _____

Neck, Trunk and Leg Score: _____

Figura 9 - Template RULA

Questo metodo è stato utilizzato per valutare i test eseguiti con gli esoscheletri a supporto delle spalle, poiché di concentra sui movimenti di braccia, collo e tronco.

1.5 Applicazione automatizzata del metodo REBA e RULA

Per questa valutazione, per poter gestire la grande quantità di dati generati dalla sensoristica, in particolare dai sensori di XSens, l'analisi ergonomica con il metodo REBA e RULA è stata effettuata tramite il tool interno del dipartimento chiamato RULAer.

Questo strumento ha permesso di:

- valutare tutte le posture assunte dagli utenti durante i test, eliminando la necessità di concentrarsi manualmente solo sulle posture più critiche
- aumentare la qualità dell'analisi, riducendo il rischio umano di commettere errori nell'applicare il metodo
- velocizzare l'elaborazione dei dati, rendendo possibile analizzare grandi quantità di informazioni in tempi ridotti

L'utilizzo di RULAer ha rappresentato quindi un miglioramento significativo rispetto a un approccio manuale, offrendo risultati più completi e accurati, essenziali per l'interpretazione delle prestazioni degli esoscheletri e per l'identificazione di eventuali benefici ergonomici.

1.6 I questionari

Altro strumento fondamentale per raccogliere dati soggettivi e qualitativi sull'esperienza e sull'efficacia degli esoscheletri sono i questionari.

Per questa valutazione sono stati creati sette questionari ciascuno mirato a raccogliere informazioni specifiche in momenti precisi del test.

Questi questionari si possono classificare in:

- questionari di familiarizzazione
- questionari intermedi
- questionari finali

1.6.1 Questionari di familiarizzazione

Questi questionari venivano compilati alla fine della fase di familiarizzazione per raccogliere informazioni di base sull'utente e una valutazione iniziale sull'esperienza con l'esoscheletro.

In particolare, le informazioni di base sull'utente che venivano raccolte erano:

- dati personali dell'utente: età, peso, altezza
- mano dominante: destra o sinistra
- grado di allenamento: valutato su tre livelli (sedentario, moderato, agonistico)
- familiarità con gli esoscheletri: tre opzioni per valutare il livello di conoscenza e utilizzo pregresso degli esoscheletri da parte dell'utente
 - “Li conosco e li ho già usati”
 - “Li conosco ma non li ho mai usati”
 - “Non li conosco e non li ho mai usati”
- problematiche posturali: se presenti, con una descrizione libera

Invece, per quanto riguarda la valutazione iniziale dell'esoscheletro, per ogni attività svolta durante la fase di familiarizzazione (es. indossare l'esoscheletro, camminare, stare in piedi, sedersi, ecc..) veniva richiesta una valutazione tramite la scala di Likert da 1 a 7, dove 1 indicava “molto difficile” e 7 “molto facile”.

Infine, nella parte finale del questionario era presente una sezione per commenti aperti, dove gli utenti potevano esprimere opinioni personali o suggerimenti.

1.6.2 Questionari intermedi

Alla fine di ogni test venivano somministrati dei questionari intermedi per raccogliere riscontri immediati sulle attività appena svolte.

Per i test sulle spalle i questionari intermedi chiedevano:

- se fosse stato indossato l'esoscheletro
- lo sforzo fisico percepito durante l'attività attraverso la scala di Borg da 0 a 11, dove 0 indicava “sforzo nullo” e 11 “sforzo massimo”
- lo sforzo fisico percepito nelle spalle, braccia e schiena attraverso la scala di Borg da 0 a 11
- come era stata l'attività in generale attraverso una scala di Likert da 1 a 7

Per i test sulla schiena i questionari intermedi avevano la stessa struttura di quelli delle spalle, con l'unica differenza che lo sforzo fisico percepito veniva richiesto per braccia, schiena e gambe; ovvero non veniva richiesto per le spalle, ma per le gambe.

Inoltre, nei questionari dei test di sollevamento veniva richiesto il peso del carico sollevato (10 Kg o 20 Kg).

1.6.3 Questionari finali

Al termine dei test relativi a ogni area (spalle o schiena), gli utenti compilavano un questionario finale.

Il questionario finale sia per i test sulle spalle che sulla schiena prevedeva tre sezioni:

- **User Experience Questionnaire (UEQ)**

Questa sezione chiedeva ai partecipanti di valutare l'esoscheletro in base a coppie di aggettivi opposti, assegnando un punteggio da 1 a 7.

In particolare, veniva richiesto di valutare:

- Comfort (es. “fastidioso” vs “piacevole”)
- Difficoltà di apprensione dell'esoscheletro (es. “difficile da apprendere” vs “facile da apprendere”)
- Ergonomia (es. “non ergonomico” vs “ergonomico”)
- Supporto (es. “ostruttivo” vs “di supporto”)
- Difficoltà di utilizzo (es. “complicato” vs “facile”)
- Soddisfazione (es. “non soddisfa le aspettative” vs “soddisfa le aspettative”)
- Efficienza (es. “inefficiente” vs “efficiente”)
- Sicurezza (es. “insicuro” vs “sicuro”)
- Leggerezza (es. “pesante” vs “leggero”)
- Utilità (es. “inutile” vs “utile”)

- **User Experience (UX)**

Questa sezione comprendeva affermazioni su vari aspetti dell'esperienza con l'esoscheletro, che i partecipanti dovevano valutare su una scala da 1 a 7 (dove 1 indicava “fortemente in disaccordo” e 7 “pienamente d'accordo”).

Le affermazioni su cui era richiesto una valutazione erano:

- Indossare l'esoscheletro mi fa sentire più sicuro nei movimenti
- Penso che la maggior parte delle persone possa trarre benefici da un utilizzo costante dell'esoscheletro
- Penso che l'esoscheletro mi faccia perdere tempo
- Penso che l'esoscheletro mi faccia assumere posture più ergonomiche
- L'utilizzo dell'esoscheletro richiede un maggiore carico mentale
- Mi sono sentito a mio agio nell'utilizzare l'esoscheletro
- Mi sento limitato nei movimenti indossando l'esoscheletro
- Mi sono sentito più affaticato utilizzando l'esoscheletro
- Indossando l'esoscheletro mi sento più potente
- Ho trovato l'esoscheletro molto difficile da usare
- Penso che mi piacerebbe utilizzare questo sistema frequentemente

- **Commento aperto sull'esperienza**

Dunque, i questionari hanno consentito di raccogliere dati soggettivi, andando ad integrare le informazioni quantitative e oggettive dei sensori. Questo approccio combinato è fondamentale per comprendere non solo l'efficacia tecnica degli esoscheletri, ma anche per valutare la loro accettabilità e usabilità in contesti reali da parte degli utenti.

1.7 I test

La fase di definizione e organizzazione dei test rappresenta una parte fondamentale della valutazione, poiché da questa dipenderà la qualità e la veridicità dei risultati.

Molto attenzione è stata dedicata alla scelta dell'attrezzatura e alla progettazione dell'ambiente di test, affinché rappresentassero situazioni realistiche e comuni nei processi lavorativi. Al contempo, i test sono stati progettati per consentire agli utenti di svolgere attività specifiche, mirate a valutare l'efficacia degli esoscheletri nelle condizioni d'uso previste.

Per analizzare il comportamento degli utenti in diverse condizioni operative, sono state realizzate diverse prove, sia dinamiche che statiche, con i diversi esoscheletri.

1.7.1 Fase di familiarizzazione

Prima di iniziare i test veri e propri, ogni utente ha preso parte a una fase di familiarizzazione con i diversi esoscheletri. In questa fase, l'utente ha indossato l'esoscheletro e svolto delle semplici e quotidiane attività, in base alla tipologia di esoscheletro testato.

Per l'esoscheletro per la schiena le attività comprendevano:

- camminata libera
- raccogliere qualcosa da terra
- sedersi
- salto
- scatto di corsa
- fare una rampa di scale

Per l'esoscheletro per le spalle le attività comprendevano:

- camminata libera
- raccogliere qualcosa da terra
- spostare un oggetto da un punto all'altro
- raccogliere un oggetto da terra nuovamente
- fare finta di bere sollevando la bottiglia
- provare a sedersi davanti al pc e utilizzarlo per 20 secondi
- rispondere al cellulare

Questa fase ha consentito ai partecipanti di familiarizzare con i dispositivi e ha permesso di individuare eventuali difficoltà iniziali nell'indossarli o utilizzarli.

Al termine della fase di familiarizzazione, venivano somministrati i questionari di familiarizzazione per raccogliere le impressioni generali degli utenti sulle attività appena svolte.

1.7.2 Test per gli esoscheletri a supporto delle spalle

Per gli esoscheletri progettati a supporto delle spalle, il protocollo prevedeva due tipologie di test, uno dinamico e uno statico, svolti entrambi con e senza esoscheletro, per consentire un confronto.

Test dinamico

In questo test gli utenti eseguivano un task di avvitatura con avvitatore (avvitatore da circa 2 Kg di peso), che prevedeva:

- Avvitare un totale di 20 viti su due profili, posizionati in posizione overhead e frontale. In particolare, 10 viti erano già predisposte equamente nei due profili e l'utente doveva solamente avvitarle, mentre le altre dovevano essere prelevate da un contenitore e avvitate in posizioni contrassegnate.
- Ogni task aveva una durata di massimo tre minuti, in cui l'utente doveva terminare l'avvitatura di tutte le vite. Alla fine del test, veniva controllata la precisione dell'avvitatura e il numero di avviture eseguite se l'utente non era riuscito a terminare il task entro i tempi massimi.
- Alla fine del test l'utente doveva compilare il questionario relativo all'esperienza d'uso e al livello di affaticamento percepito.

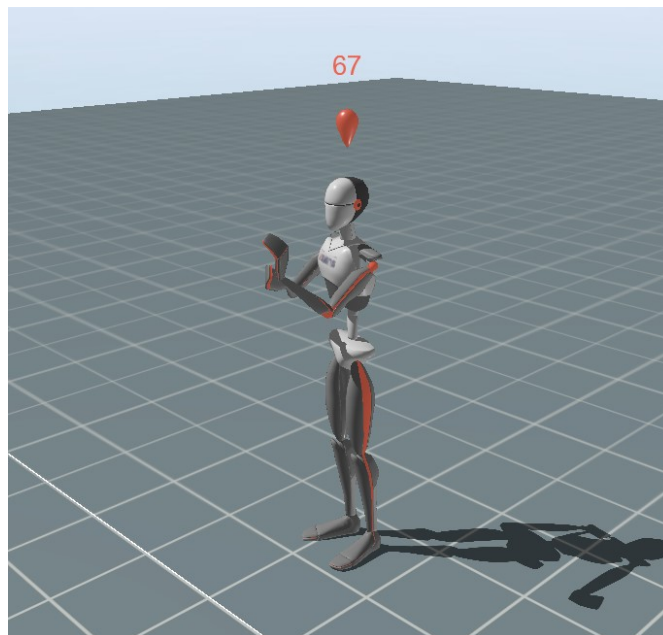


Figura 10 -Istantanea della registrazione mentre l'utente esegue il test dinamico

Test statico

Il test statico consisteva nel posizionarsi in posizione eretta, con i bracci a 90 gradi tenendo un avvitatore (da circa 2 Kg di peso), in modo da simulare un'avvitatura overhead.

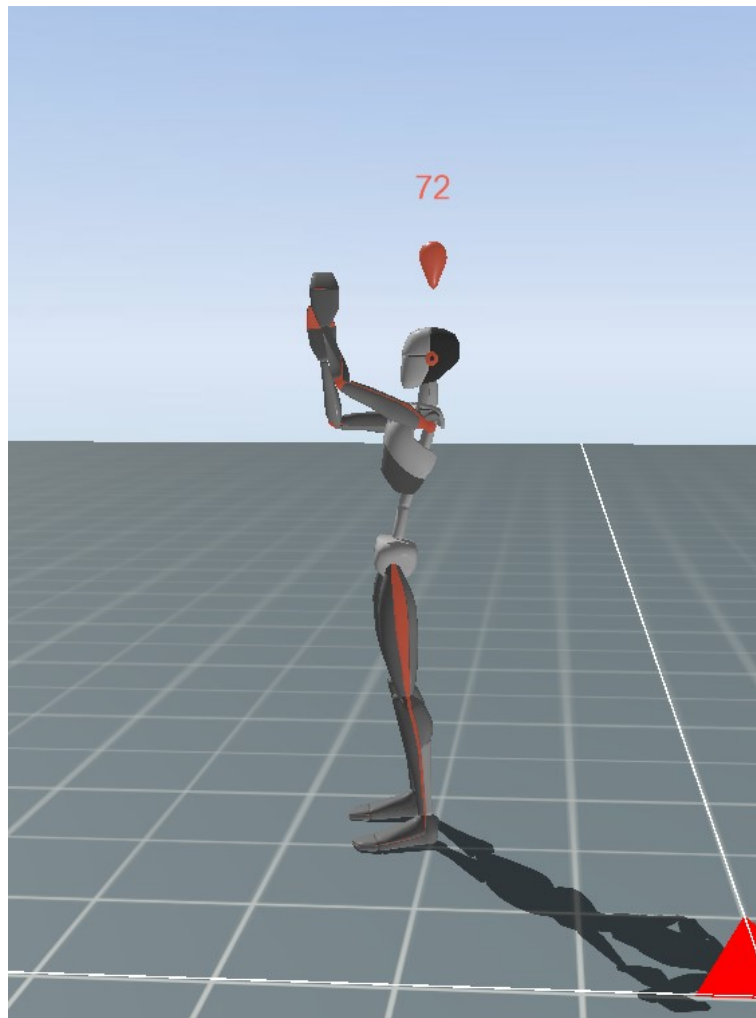


Figura 11 - Istantanea della registrazione mentre l'utente esegue il test statico

L'utente doveva tenere questa posizione per tre minuti o fino al raggiungimento di un livello di affaticamento percepito pari a dieci sulla scala di Borg.

Durante il test, ogni 30 secondi veniva chiesto all'utente di valutare il grado di affaticamento percepito rispetto alla scala di Borg, per valutare l'endurance e confrontare le prestazioni con e senza esoscheletro.

Alla fine del test l'utente doveva compilare il questionario relativo all'esperienza d'uso e al livello di affaticamento percepito.

1.7.3 Test per gli esoscheletri a supporto della schiena

Per gli esoscheletri progettati a supporto della schiena, il protocollo prevedeva delle attività che simulavano scenari di sollevamento, abbassamento e trasporto di pesi.

Test dinamico con sollevamento/abbassamento con 10 Kg

Il test consisteva nel posizionare una box da 10 Kg in una scaffalatura con 3 ripiani a diverse altezze (40 cm, 80 cm e 120 cm).

L'utente doveva prendere la box dal ripiano da 40 cm e metterla nel ripiano da 80 cm, per poi riprenderla e metterla nel ripiano da 120 cm, e continuare con il percorso inverso.

L'utente doveva ripetere questo loop per tre minuti con la propria velocità di esecuzione, con l'esoscheletro attivato al massimo supporto e senza esoscheletro.

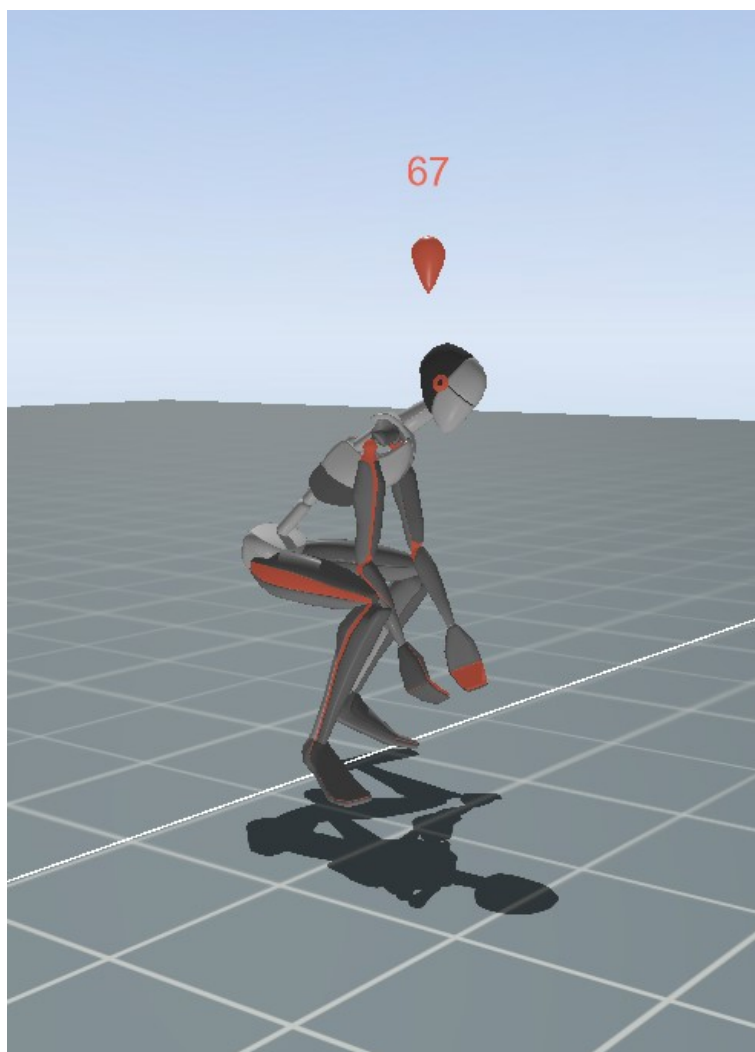


Figura 12 - Istantanea della registrazione mentre l'utente esegue il test dinamico con sollevamento/abbassamento

Durante il test, venivano contate le movimentazioni eseguite e alla fine del test l'utente doveva compilare il questionario relativo all'esperienza d'uso e al livello di affaticamento percepito.

Questo test permetteva di simulare dei sollevamenti e abbassamenti, inoltre le guide presenti nei ripiani permettevano di eseguire il posizionamento della box in modo preciso.

Test dinamico con sollevamento/abbassamento con 20 Kg

Questo test era simile al test con 10 Kg, con la differenza che la box in questo caso era da 20 Kg e veniva eseguito un solo loop, ovvero l'utente doveva prelevare la box dal ripiano da 40 cm, posizionarla in quello da 80 cm, portarla in quello da 120 cm e ripetere i passaggi fino al ripiano da 40 cm, dopodiché il test si concludeva.

Anche alla fine di questo test l'utente doveva compilare il questionario relativo all'esperienza d'uso e al livello di affaticamento percepito.

Test dinamico con trasporto

In questo test, gli utenti trasportavano una box da 10 Kg da una posizione A (bancale a terra) a una posizione B (ripiano a 40 cm da terra), percorrendo alcuni metri.

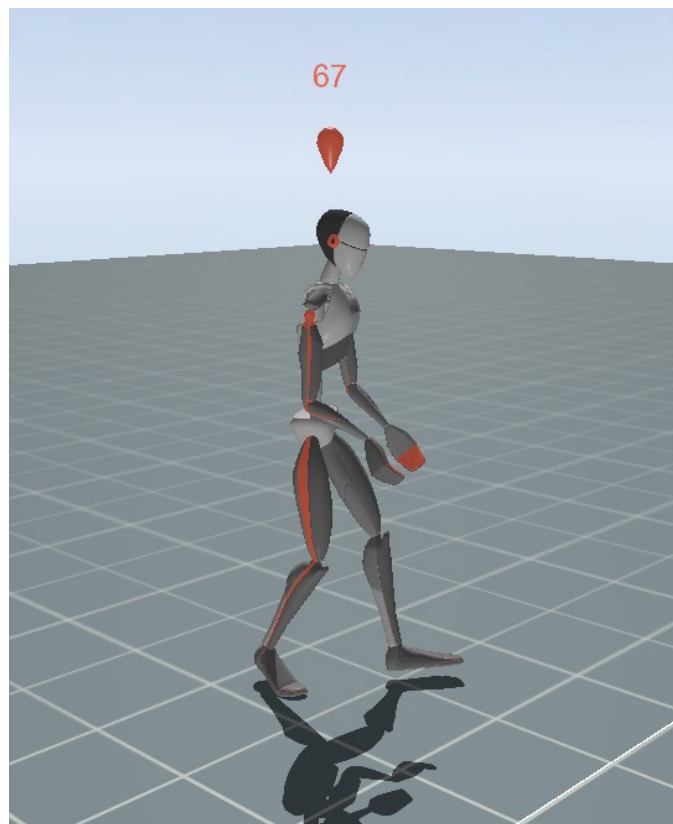


Figura 13 - Istantanea della registrazione mentre l'utente esegue il test dinamico con trasporto

Il test prevedeva cinque cicli completi (da A a B e da B ad A) e durante il test, ogni volta che l'utente raggiungeva il punto A, doveva esprimere il livello di affaticamento percepito rispetto alla scala di Borg (da 0 a 10).

Anche alla fine di questo test l'utente doveva compilare il questionario relativo all'esperienza d'uso e al livello di affaticamento percepito.

Questo protocollo di test ben strutturato e definito ha permesso di eseguire una valutazione completa delle prestazioni degli esoscheletri in scenari di utilizzo rappresentativi, comprendendo le potenzialità e i limiti di ciascun esoscheletro.

1.8 Gli utenti che hanno eseguito i test

Gli utenti coinvolti in questo studio sono stati dei volontari appartenenti al mondo accademico, reclutati all'interno dell'università.

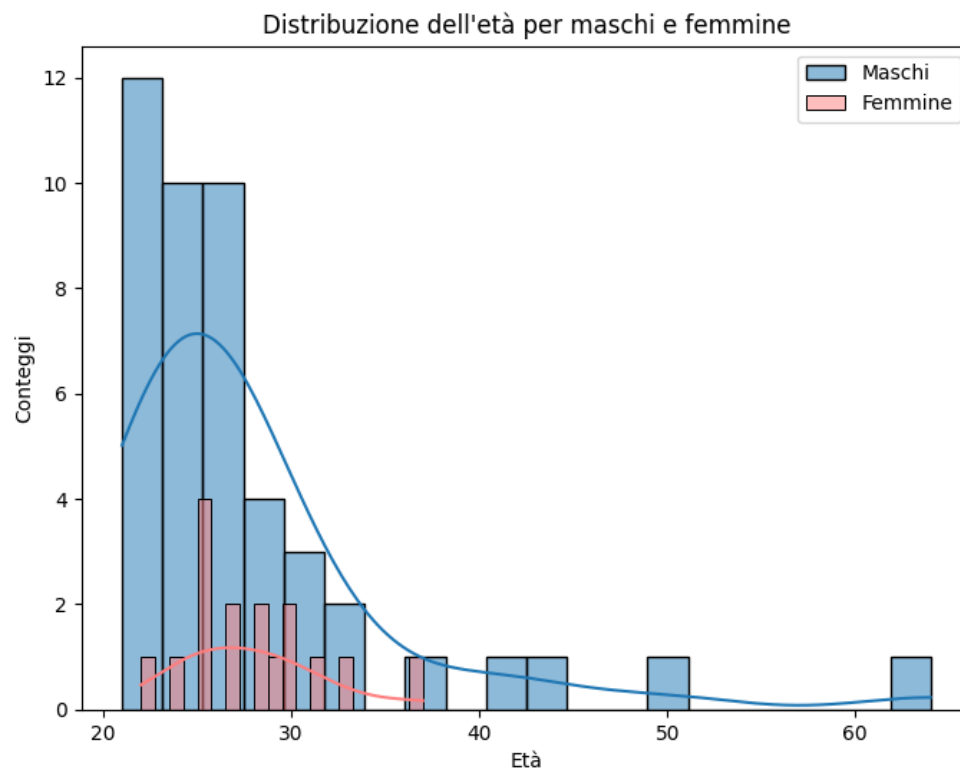
Il campione è composto da una combinazione di uomini e donne, selezionati con l'obiettivo di rappresentare un'ampia gamma di caratteristiche antropometriche e condizioni fisiche.

Nella selezione del campione si è posta particolare attenzione a questi due aspetti:

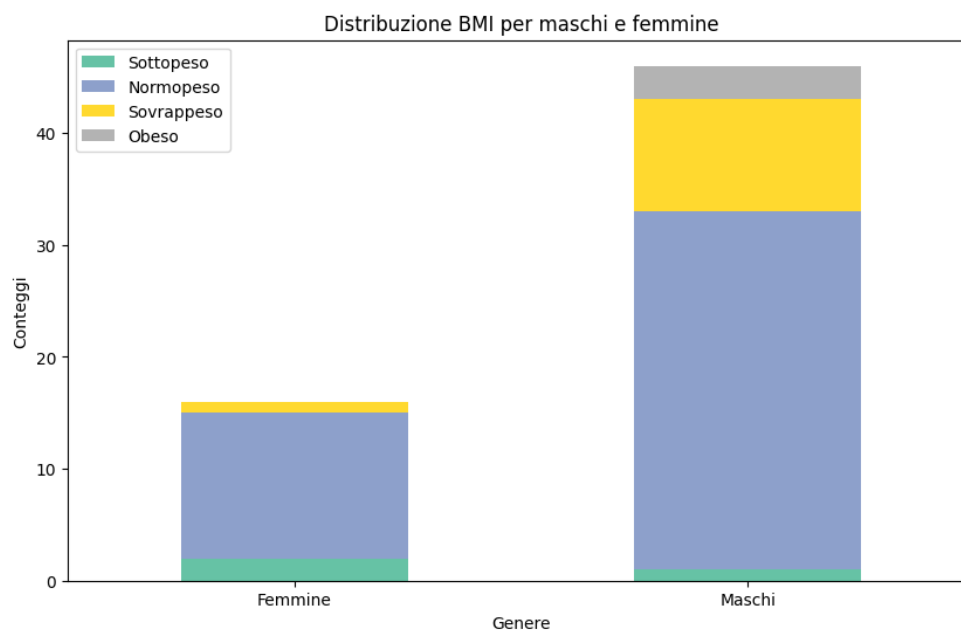
- distribuzione dell'età: è stata presa in considerazione l'età media del campione, selezionando partecipanti che rappresentassero una fascia d'età adeguata e omogenea rispetto al tipo di valutazione, per evitare che l'età influenzasse i risultati.
- diversità di genere: è stata garantita la presenza di uomini e donne per esaminare eventuali differenze nella percezione del comfort e dell'efficacia.

Il campione è composto da 62 utenti, di cui 46 maschi e 16 femmine, con un'età media di 28 anni.

Il seguente grafico rappresenta la distribuzione dell'età dei partecipanti, separata per genere, e per entrambi i gruppi si può osservare una prevalenza di giovani adulti.



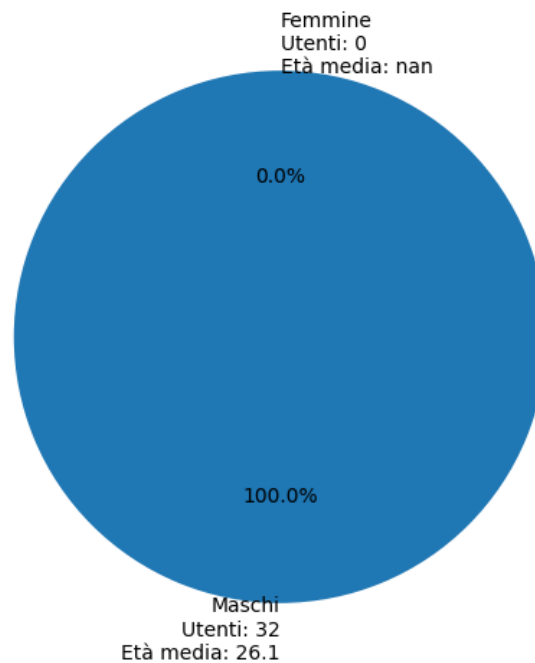
Il secondo grafico mostra la distribuzione dell'indice di massa corporea dei partecipanti, separato per genere. Questa distribuzione consente di comprendere meglio le caratteristiche fisiche del campione, il quale è stato selezionato per includere persone con diverse caratteristiche antropometriche.



Infine, vengono presentati due grafici che mostrano la distribuzione di genere in relazione ai due tipi di esoscheletri testati: uno a supporto della schiena e uno a supporto delle spalle.

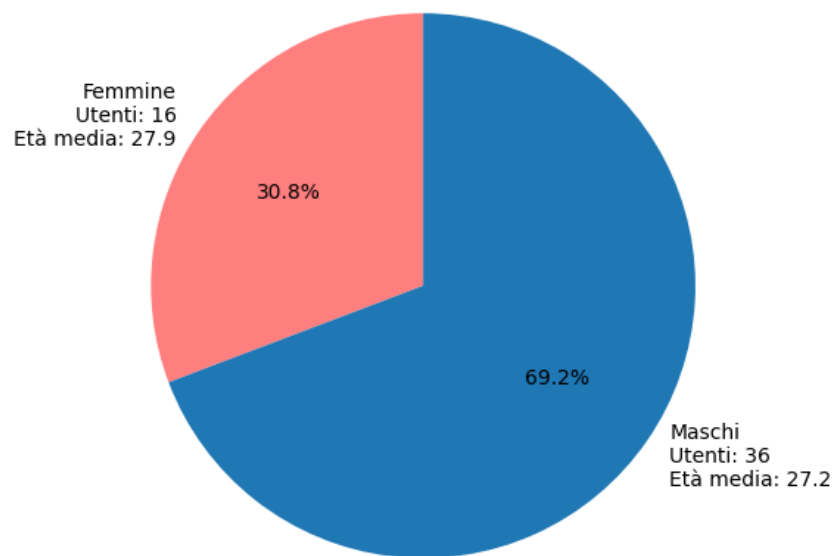
Il primo grafico mostra che l'esoscheletro a supporto della schiena è stato testato esclusivamente da partecipanti maschi. Questo è dovuto al fatto che l'esoscheletro era disponibile solo in una taglia grande, che risultava troppo grande per le partecipanti femmine.

Distribuzione di genere per tipo di esoscheletro testato: a supporto della schiena



Il secondo grafico invece mostra che l'esoscheletro a supporto delle spalle è stato testato sia da maschi che da femmine, poiché la taglia era adatta per entrambi i generi.

Distribuzione di genere per tipo di esoscheletro testato: a supporto delle spalle



1.9 Esecuzione dei test e raccolta dati

La fase di esecuzione dei test è stata progettata per garantire una raccolta dati precisa e strutturata.

La procedura prevedeva diversi passaggi ben definiti, dalla raccolta dei dati anagrafici all'esecuzione dei test veri e propri, con particolare attenzione ad eseguire tutti i passaggi definiti nel protocollo di test e ai riscontri espressi dagli utenti durante i test.

1.9.1 Procedura iniziale

Raccolta dei dati anagrafici

All'inizio della sessione, a ogni utente venivano richiesti i dati anagrafici principali, inclusi età, peso e alcune misure antropometriche.

Questi dati servivano per calibrare i vari sensori applicati e creare un profilo dell'utente, ma anche per contestualizzare i risultati e garantire un'analisi demografica accurata.

Randomizzazione dell'ordine dei test

Per ogni partecipante, l'ordine di esecuzione dei test era randomizzato, così da ridurre l'effetto di eventuali bias legati all'ordine delle prove.

Questa randomizzazione si applicava sia ai test con che senza esoscheletro, alternando le condizioni in maniera casuale.

1.9.2 Fase di familiarizzazione

Prima di iniziare i test, i partecipanti attraversavano una fase di familiarizzazione, durante la quale:

- Indossavano l'esoscheletro per la prima volta.
- Si regolava l'esoscheletro sul corpo del partecipante per assicurare una vestibilità comoda e funzionale.
- Il partecipante svolgeva alcune attività semplici per abituarsi al dispositivo (ad esempio, camminare o eseguire piccoli movimenti come descritto nel punto precedente).

Al termine della familiarizzazione, l'utente compilava il primo questionario, fornendo una valutazione iniziale sull'esperienza e sul comfort.

1.9.3 Preparazione e calibrazione dei sensori

Dopo la fase di familiarizzazione, si procedeva alla preparazione del partecipante per i test veri e propri:

- I sensori di XSens venivano posizionati in tutte le aree richieste dal protocollo, coprendo le articolazioni e segmenti corporei principali.
- Gli elettromiografi FREEEMG venivano applicati ai muscoli target, a seconda del tipo di test (spalle o schiena).
- Lo smartwatch per l'empatica veniva posizionato sulla mano non dominante.
- Indossato l'esoscheletro (se previsto dal test).

Calibrazione dei sensori di XSens

Prima di iniziare il test per una buona acquisizione dati era necessario calibrare i sensori di XSens.

La calibrazione veniva effettuata utilizzando la procedura N-pose o T-pose, a seconda delle esigenze ma favorendo la procedura N-pose.



Figura 14 - Posizione N-pose



Figura 15 - Posizione T-pose

La procedura N-pose consisteva nel far assumere all'utente una postura naturale, con i piedi paralleli e le braccia rilassate lungo i fianchi.

L'utente doveva mantenere la posizione N-pose per 4 secondi, senza muoversi.

Dopodiché doveva realizzare un otto camminando in 15 secondi, consigliando di muovere le braccia in modo naturale evitando movimenti rapidi (ad esempio, oscillandole mentre si cammina) e ritornare nella posizione iniziale.

Una volta tornato nella posizione e postura iniziale, l'utente doveva rimanere immobile per la calibrazione finale.

Alla fine di quest'ultima fase il software indicava il completamento della calibrazione e la sua qualità.

Se la qualità fosse stata buona, all'utente sarebbe stato chiesto di muoversi liberamente in modo da attivare tutti i sensori e verificare la qualità dei movimenti, altrimenti se la calibrazione non fosse stata accettabile sarebbe stato rieseguito tutto il processo.

Per quanto riguarda invece la calibrazione T-pose, la procedura è identica alla calibrazione appena descritta, eccetto per la postura iniziale, in cui l'utente doveva assumere una posizione con le braccia sollevate a 90 gradi rispetto al corpo, formando una "T". Tutti gli altri passaggi rimangono invariati.

Questa fase era essenziale per garantire la qualità dei dati raccolti.

1.9.4 Esecuzione dei test

Una volta completata la preparazione, si procedeva con i test, seguendo i seguenti passaggi:

- **Inizio del test**
 - Si avviavano in contemporanea le registrazioni di XSens, degli elettromiografi FREEEMG e della videocamera.
 - Dopo pochi secondi, si applicava il tag sullo smartwatch, segnando l'inizio effettivo del test, e si faceva partire il cronometro.
 - L'utente iniziava a svolgere il task previsto dal test.

- **Conclusione del test**
 - Al termine del task, si inseriva un tag di fine sullo smartwatch, si bloccava il cronometro e si fermavano tutte le registrazioni dei sensori.
 - L'utente compilava un questionario di valutazione relativo al test appena svolto.

1.9.5 Transizione tra i test

Tra un test e l'altro, venivano effettuate diverse operazioni:

- **Controllo dei sensori:** Si verificava che tutti i sensori fossero ancora attivi, posizionati correttamente e non influenzati da urti avvenuti durante il test o dall'eccessiva sudorazione dell'utente. In caso di necessità, venivano riposizionati e rieseguita la calibrazione.
- **Preparazione dell'ambiente:** L'ambiente di test veniva adattato per il test successivo, ad esempio modificando le postazioni o l'attrezzatura (in particolare il peso della box).
- **Ricalibrazione di XSens:** Nel caso di passaggio tra test con e senza esoscheletro (o viceversa), si eseguiva una nuova calibrazione. Poiché l'indossare o rimuovere l'esoscheletro poteva alterare la postura naturale dell'utente.

1.9.6 Monitoraggio delle impressioni degli utenti

Durante i test, veniva posta particolare attenzione alle osservazioni spontanee e ai commenti espressi dai partecipanti riguardo al test o all'esoscheletro.

Questi feedback venivano annotati e successivamente richiesti in forma scritta nei questionari finali.

Le impressioni degli utenti rappresentano un elemento qualitativo fondamentale per l'interpretazione dei dati e la valutazione complessiva dei dispositivi.

1.9.7 Conclusione della sessione

Al termine di tutti i test, tutti i sensori venivano rimossi dall'utente e preparati per l'utente successivo.

Infine, si ringraziava l'utente per la partecipazione e si raccoglieva un'ultima impressione generale sull'esperienza complessiva.

Questa procedura ha garantito un'esecuzione strutturata, riducendo al minimo errori e durata dei test, assicurando un'esperienza positiva ai partecipanti e una migliore qualità dei dati raccolti.

Capitolo 2

Analisi Posturale

In questo capitolo verrà descritto il processo di elaborazione dei dati raccolti durante i test e presentati i risultati dell'analisi posturale, effettuata tramite i metodi precedentemente descritti REBA e RULA.

Il capitolo è suddiviso in tre sezioni principali:

- Preparazione dei dati per l'analisi: che illustra i dati che sono stati considerati in questa analisi e il loro processo di elaborazione.
- Analisi descrittiva: in cui vengono presentati i risultati osservati e le tendenze generali
- Analisi statistica: in cui viene valutata la significatività tra le variabili considerate

2.1 Preparazione dei dati per l'analisi

Dopo aver completato tutti i test e raccolto i dati, il lavoro si è concentrato sull'analisi ergonomica e sull'analisi dei questionari, escludendo per questa tesi i dati provenienti dagli elettromiografi e dallo smartwatch dell'empatica, che sono stati analizzati da un altro gruppo.

Il processo di preparazione dei dati ha seguito diverse fasi, descritte di seguito:

- Esportazione dei dati di XSens
- Revisione delle registrazioni
- Inserimento dei dati in RULAer
- Aggregazione dei risultati

2.1.1 Esportazione dei dati di XSens

I dati raccolti durante ogni test tramite i sensori di XSens sono stati esportati in formato Excel.

Per ciascun test eseguito, è stato generato un file Excel composto da tre schede, contenenti informazioni dettagliate sul movimento degli utenti:

- **General Information**

Questa scheda riporta informazioni generali relative al test e alla configurazione del sistema, tra cui:

- Il nome del file di registrazione
- Il nome dell'utente
- Il giorno e l'ora di registrazione
- La frequenza dei fotogrammi
- La qualità del processamento

- **Joint Angles ZXY**

Questa scheda contiene i dati sugli angoli articolari rilevati in base alla rotazione ZXY. I dati sono organizzati in colonne che rappresentano:

- Nome dell'angolo: es. "Left Shoulder Abduction/Adduction", "Left Shoulder Internal/External Rotation", "Left Shoulder Flexion/Extension"
- Valori angolari: le misurazioni in gradi relative a ciascun frame del test

- **Ergonomic Joint Angles ZXY**

In questa scheda, vengono riportati gli angoli articolari ergonomici e sono organizzati nella stessa maniera della scheda precedente.

Per ottimizzare l'analisi e gestire la grande quantità di dati, durante l'esportazione è stato applicato uno skip frame di 9, riducendo i dati esportati a un frame ogni 10. Questo processo ha permesso di mantenere una rappresentazione accurata del movimento degli utenti lungo l'arco temporale del test, pur semplificando il volume complessivo di dati da elaborare.

Oltre ai file Excel, per l'applicazione del metodo RULA per ogni utente è stato necessario esportare anche il file in formato MVNX.

2.1.2 Revisione delle registrazioni

Ogni registrazione è stata attentamente rivista per identificare i frame di inizio e fine di ciascun test.

Questo passaggio è stato fondamentale per:

- Isolare i dati rilevanti: garantendo che l'analisi fosse limitata al periodo effettivo di esecuzione del task previsto dal protocollo.
- Individuare movimenti non previsti dal test: durante la revisione, è stato possibile identificare e isolare azioni eseguite dagli utenti che non facevano parte del task definito.

Alcuni esempi di movimenti non richiesti includono:

- Rotazione non necessarie del collo
- Sollevamenti o movimenti delle braccia non previsti dal test
- Pause o interruzioni durante l'esecuzione del compito
- Aggiustamenti dell'esoscheletro

Questi movimenti non previsti sono stati esclusi dall'analisi, poiché potevano introdurre rumore nei dati e influenzare i risultati finali.

La revisione dettagliata ha quindi consentito di migliorare la qualità dei dati analizzati, assicurando che i risultati riflettessero fedelmente l'esecuzione del task secondo il protocollo di test.

2.1.3 Inserimento dei dati in RULAer

Una volta identificati i frame iniziali e finali e corretto i movimenti non previsti, i file Excel e MVNX sono stati caricati in RULAer, uno strumento interno progettato per applicare automaticamente i metodi REBA e RULA.

Per ciascun test, è stato necessario:

- Caricare i file esportati da XSens
- Inserire i frame di inizio e fine del test
- Specificare i parametri richiesti in base al tipo di analisi e test

La tabella seguente riassume i parametri inseriti per ogni tipologia di test:

Test	Metodo	Parametri inseriti
Dinamico per le spalle	RULA	Arm Supported: “Sì” se era stato indossato l’esoscheletro e “No” se non era stato indossato. Muscle Use: “Sì”
Statico per le spalle	RULA	Arm Supported: “Sì” se era stato indossato l’esoscheletro e “No” se non era stato indossato. Muscle Use: “No”
Dinamico con sollevamento/abbassamento con 10 Kg per la schiena	REBA	Attivity Score: “Sì” Force Load: “compreso tra 5 e 10 Kg”
Dinamico con sollevamento/abbassamento con 20 Kg per la schiena	REBA	Attivity Score: “No” Force Load: “> 10 Kg”
Dinamico con trasporto per la schiena	REBA	Attivity Score: “Sì” Force Load: “compreso tra 5 e 10 Kg”

2.1.4 Aggregazione dei risultati

Una volta completato il processo con RULAer per tutti i test, i risultati ottenuti (valori REBA o RULA) sono stati aggregati in un unico file Excel.

Questo file contiene i punteggi di rischio ergonomico calcolati per ciascun test ed è stato fondamentale per condurre un'analisi globale descrittiva e statistica, che verrà dettagliatamente illustrata nel capitolo successivo.

2.2 Analisi descrittiva

In questa sezione vengono presentati i risultati dell'analisi descrittiva, focalizzandosi sugli indici di rischio posturale calcolati tramite i metodi REBA e RULA.

L'analisi è stata eseguita utilizzando il file con i risultati aggregati creato in precedenza.

I risultati REBA e RULA sono stati analizzati contestualizzando i dati rispetto a variabili rilevanti, tra cui:

- Informazioni generali sugli utenti (TIME, USER, GENDER, AGE, WEIGHT, HEIGHT, DOMINANT HAND, DISORDER, FITNESS, FAMILIARITY).
- Informazioni relative agli esoscheletri (EXO, EXO TYPE, EXO BRAND, LIVELLO DI ATTIVAZIONE).
- Dettagli sui test eseguiti (TASK BACK, TASK ORDER).

Nelle prossime due sezioni verranno commentati grafici e tabelle, mostrando distribuzioni, medie e altre metriche derivate dai dati per le due parti del corpo considerate (RIGHT e LEFT).

2.2.1 Analisi descrittiva con i risultati REBA

Classificazione del rischio

Il metodo REBA ha permesso di classificare ogni frame registrato durante i test in base a cinque livelli di rischio ergonomico:

- Negligible (1): rischio trascurabile
- Low-risk (2-3): rischio basso
- Medium-risk (4-7): rischio medio
- High-risk (8-10): rischio alto
- Very-high-risk (11+): rischio molto alto

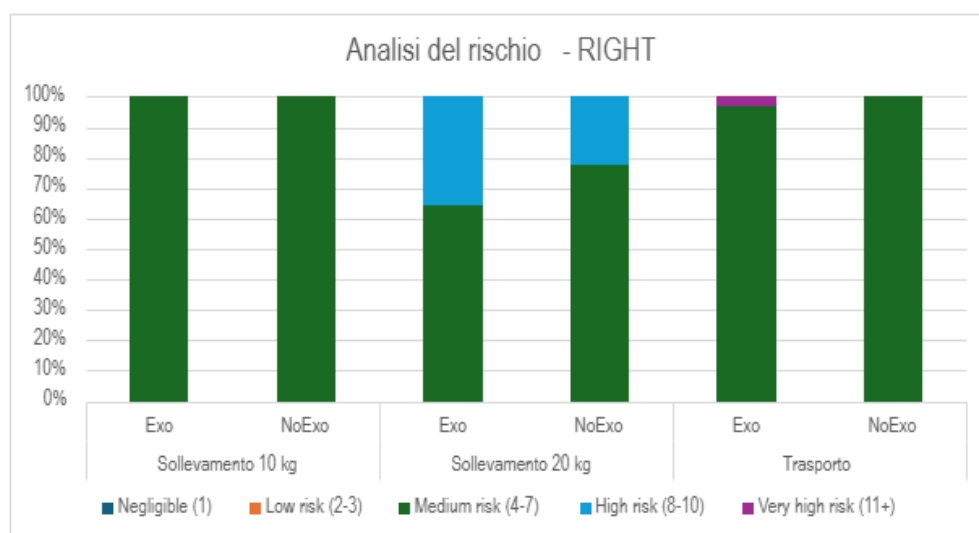
Per ogni test, si è dunque trovata la percentuale di posture appartenenti a ciascun livello di rischio per la parte RIGHT e LEFT.

Il livello di rischio finale del test è stato assegnato sulla base del livello con la percentuale più alta tra i cinque, fornendo così una classificazione del rischio per ogni test.

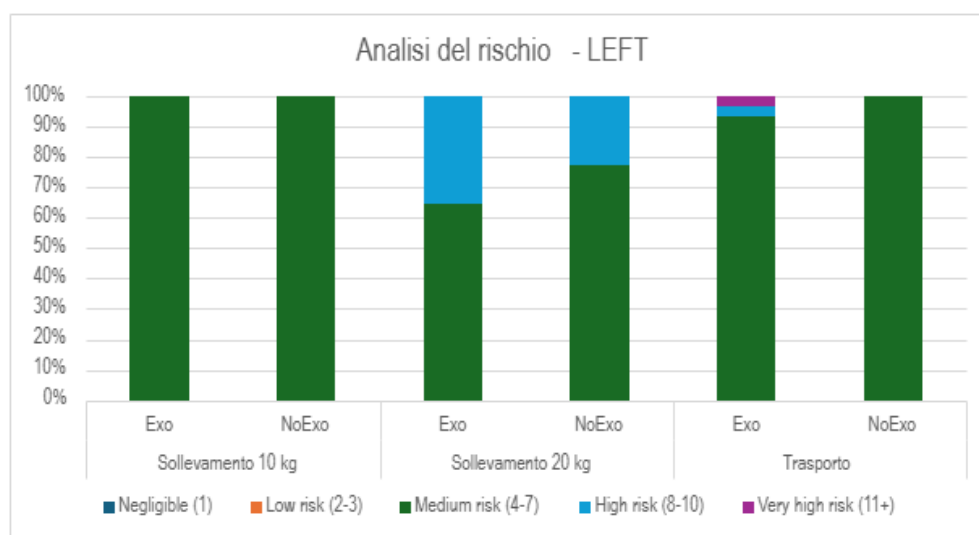
Distribuzione del rischio

Un'analisi iniziale ha considerato la distribuzione dei livelli di rischio nei vari task, separando i risultati per condizione con esoscheletro (Exo) e senza esoscheletro (NoExo).

Analisi del rischio - RIGHT						
	Soll. 10 kg		Soll. 20 kg		Trasporto	
	Exo	NoExo	Exo	NoExo	Exo	NoExo
Negligible (1)	0	0	0	0	0	0
Low risk (2-3)	0	0	0	0	0	0
Medium risk (4-7)	31	31	20	24	30	31
High risk (8-10)	0	0	11	7	0	0
Very high risk (11+)	0	0	0	0	1	0



Analisi del rischio - LEFT						
	Soll. 10 kg		Soll. 20 kg		Trasporto	
	Exo	NoExo	Exo	NoExo	Exo	NoExo
Negligible (1)	0	0	0	0	0	0
Low risk (2-3)	0	0	0	0	0	0
Medium risk (4-7)	31	31	20	24	29	31
High risk (8-10)	0	0	11	7	1	0
Very high risk (11+)	0	0	0	0	1	0



Dall'analisi delle tabelle e grafici emerge che la maggior parte dei test si è svolta in una condizione di rischio ergonomico medio sia per la parte RIGHT che per la LEFT. Tuttavia, si osserva un incremento del rischio ergonomico nel task di sollevamento da 20 kg, dove si registrano più posture classificate nei livelli High-risk (8-10) rispetto agli altri task.

Un aspetto particolarmente interessante è che, per i task di sollevamento da 20 kg e trasporto, l'utilizzo dell'esoscheletro sembra aver peggiorato la situazione, portando a un numero maggiore di test con livelli di rischio più elevati rispetto alla condizione senza esoscheletro. Questo suggerisce che, in alcune circostanze, l'uso dell'esoscheletro potrebbe aver influenzato negativamente la postura degli utenti, aumentando il carico ergonomico invece di ridurlo.

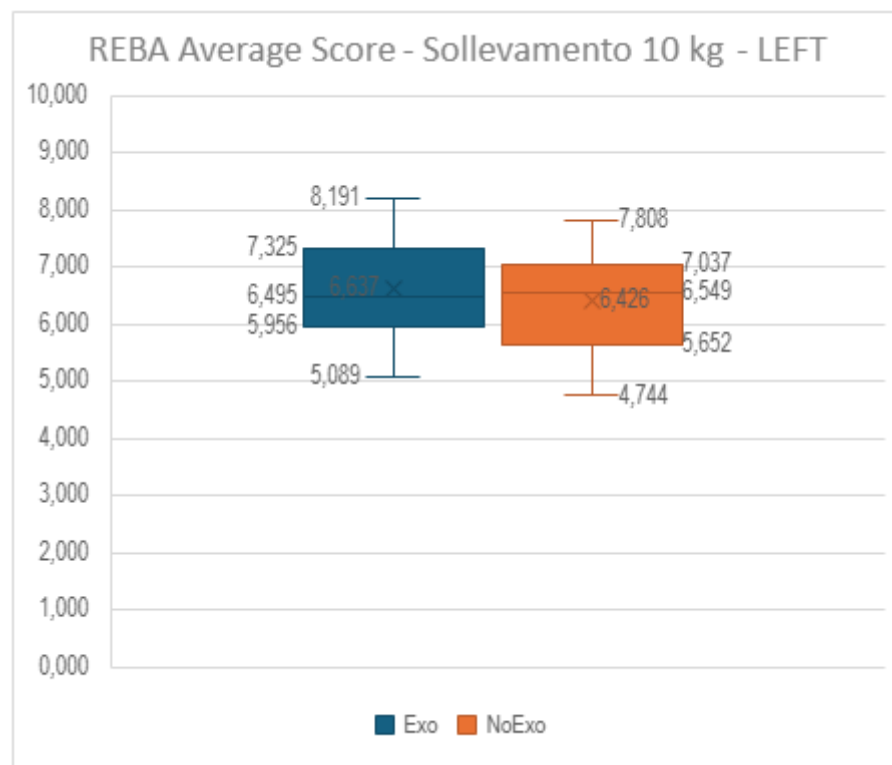
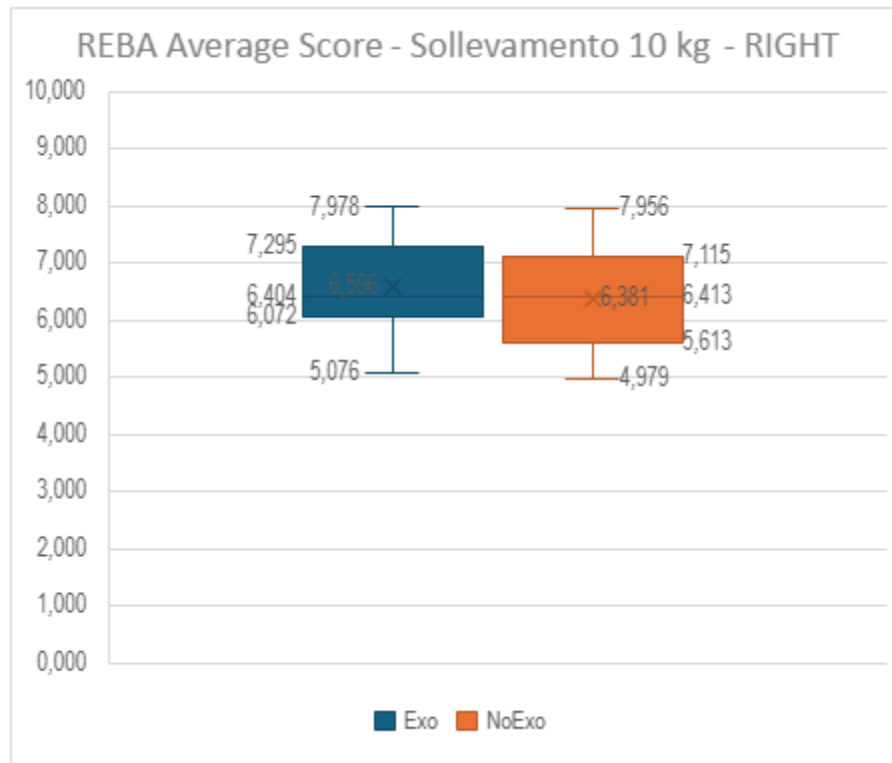
Indici di rischio

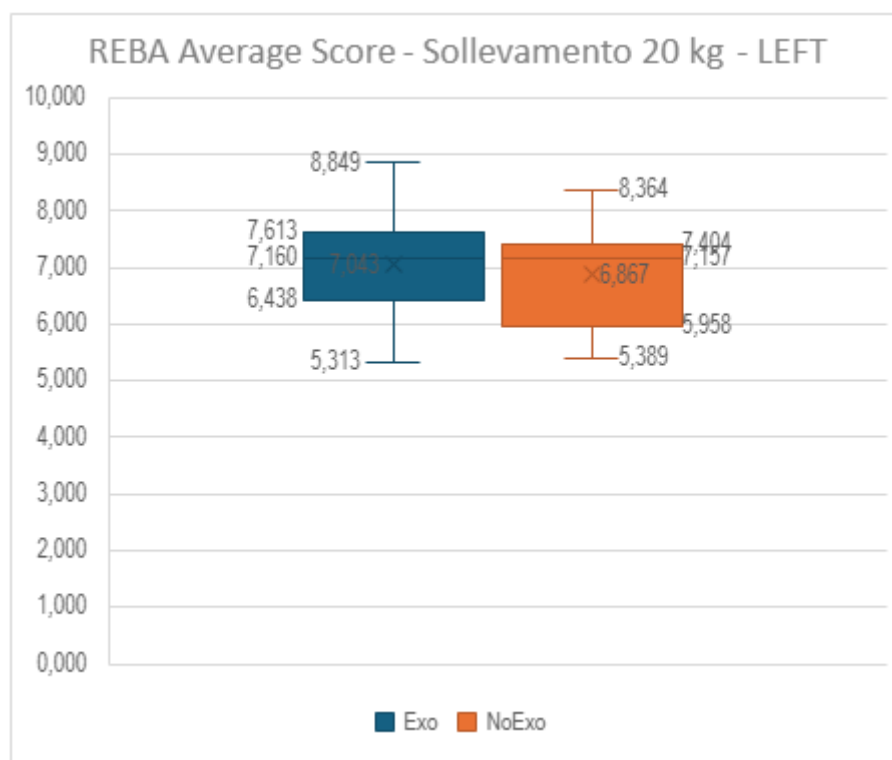
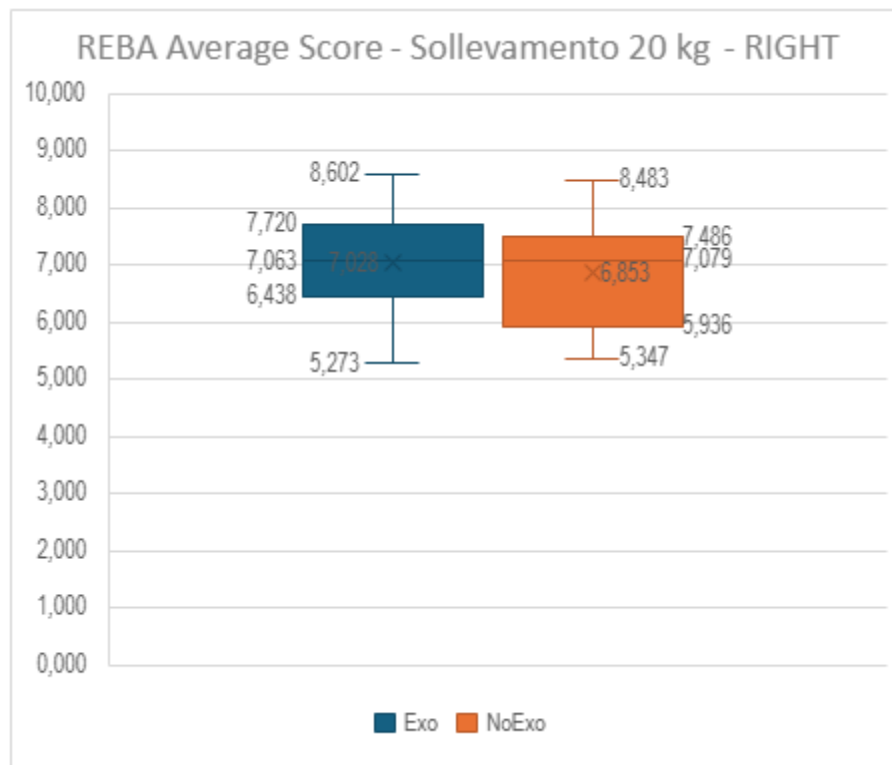
Oltre all'analisi precedente, sono stati analizzati gli indici di rischio REBA calcolati per ciascun test.

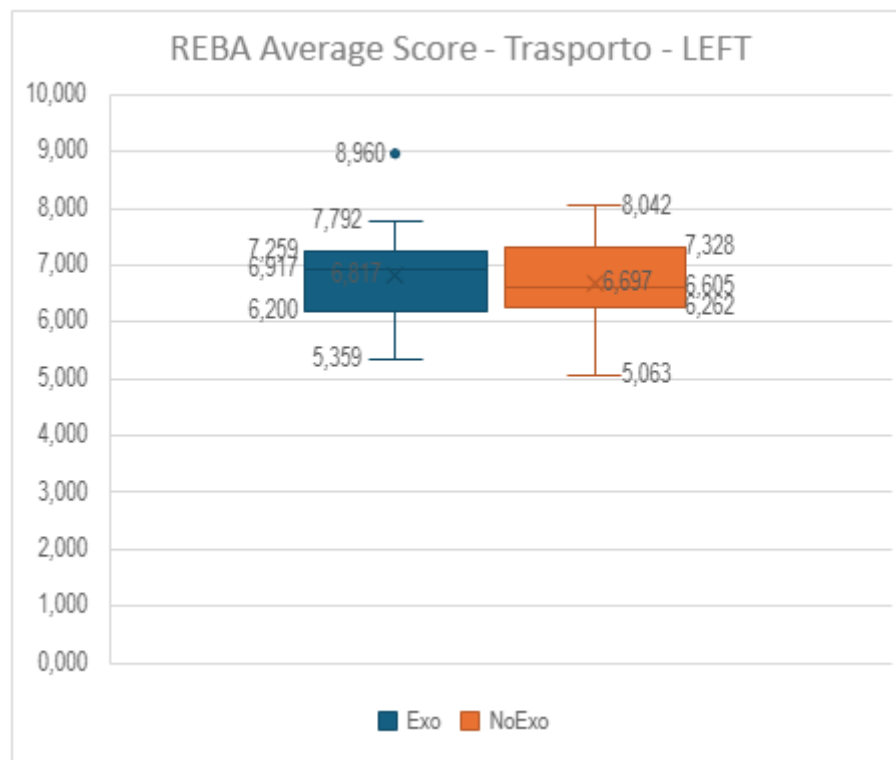
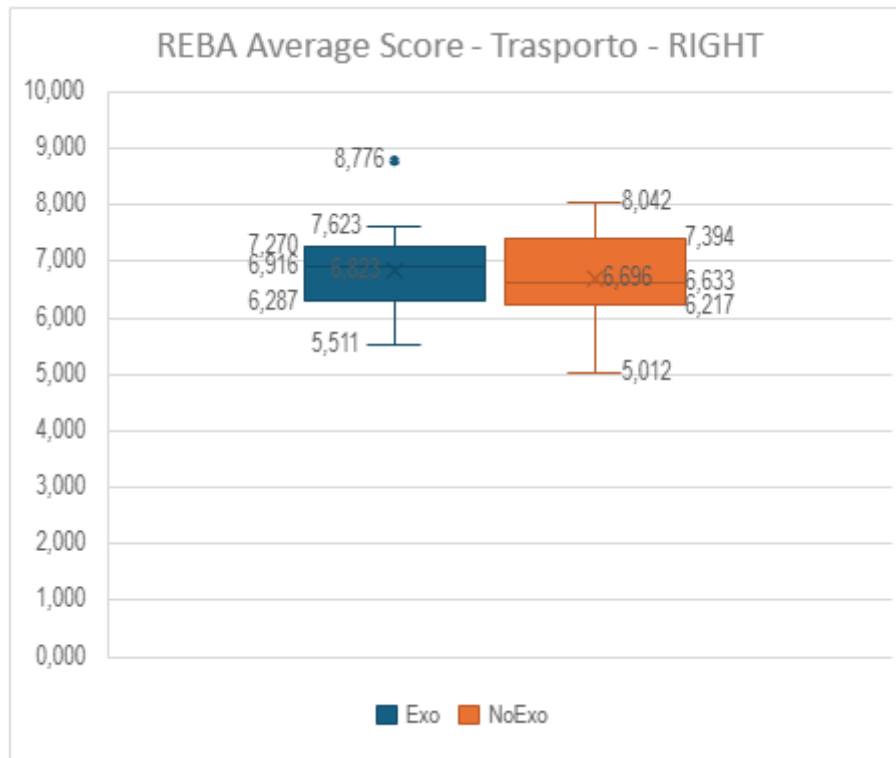
Questi indici sono stati suddivisi in base al tipo di task e alla parte del corpo considerata (RIGHT e LEFT), consentendo di confrontare le condizioni con esoscheletro (Exo) e senza esoscheletro (NoExo). Per rappresentare questi dati in modo chiaro, sono stati utilizzati i diagrammi a scatola e baffi, che mostrano la distribuzione dei valori di rischio REBA.

Infatti, questi grafici permettono di osservare:

- La variabilità degli indici di rischio REBA.
- La mediana e i quartili, che evidenziano i valori centrali e la dispersione dei dati.
- La presenza di eventuali outlier, indicativi di situazioni particolari in cui il rischio ergonomico si è discostato dalla norma.







Dall'analisi dei diagrammi relativi ai diversi task emergono le seguenti osservazioni:

- Sollevamento 10 kg
 - I valori di rischio REBA nelle condizioni NoExo e Exo risultano complessivamente simili, sia per la parte RIGHT che per la LEFT.
 - Tuttavia, l'esoscheletro non sembra avere un impatto positivo su questo task, poiché i valori di rischio REBA tendono a essere leggermente più alti nella condizione Exo rispetto a NoExo.
- Sollevamento 20 kg
 - Analogamente al task precedente, i valori di rischio REBA sono simili tra la parte RIGHT e LEFT.
 - L'indice di rischio risulta più elevato rispetto al sollevamento da 10 kg, il che è prevedibile data la maggiore entità del carico sollevato.
 - Anche in questo caso, l'esoscheletro non migliora l'ergonomia e, anzi, sembra aumentare il rischio posturale.
- Trasporto
 - I valori di rischio REBA per il task trasporto sono leggermente inferiori rispetto al sollevamento da 20 kg, ma più alti rispetto al sollevamento da 10 kg.
 - A differenza degli altri due task, l'utilizzo dell'esoscheletro sembra portare a una leggera riduzione dell'indice di rischio.

Questi risultati suggeriscono che, sebbene l'esoscheletro possa offrire un piccolo beneficio nel trasporto, non apporta miglioramenti significativi nei task di sollevamento e, anzi, potrebbe avere un impatto negativo sull'ergonomia in tali attività.

2.2.2 Analisi descrittiva con i risultati RULA

Classificazione del rischio

Analogamente all'analisi REBA, il metodo RULA classifica ogni frame in base a dei livelli di rischio ergonomico, con la differenza che nel RULA ci sono solo quattro livelli di rischio:

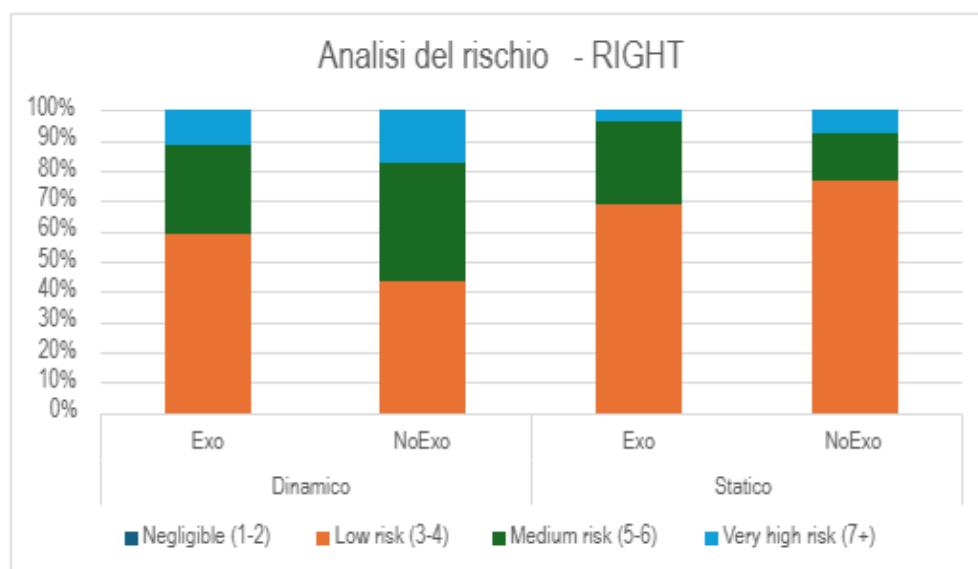
- Negligible (1-2): rischio trascurabile
- Low-risk (3-4): rischio basso
- Medium-risk (5-6): rischio medio
- Very-high-risk (7+): rischio molto alto

Anche in questo caso, il livello di rischio predominante per ciascun test è stato determinato in base alla percentuale maggiore di posture in ciascun livello.

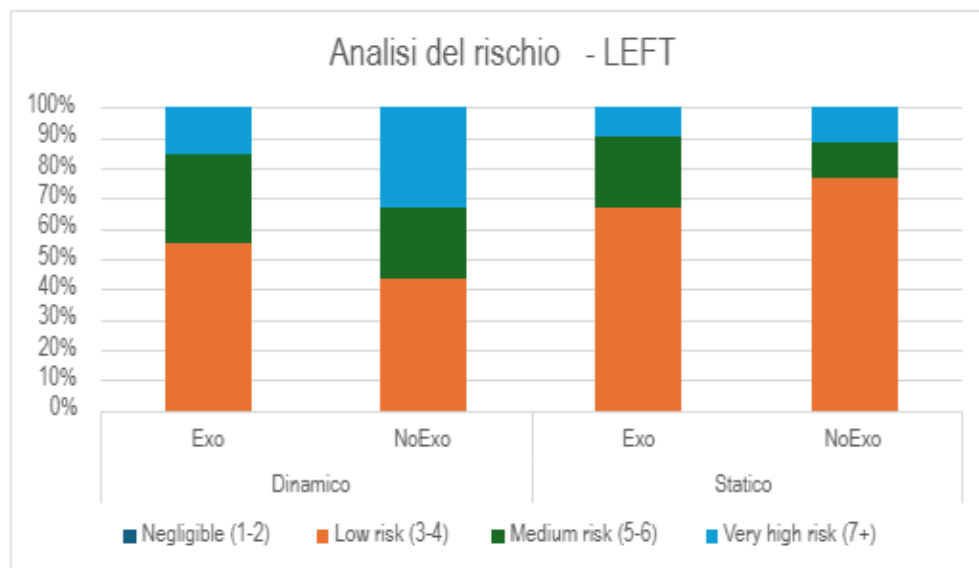
Distribuzione del rischio

I grafici mostrano la distribuzione dei livelli di rischio RULA per ogni task, separando le condizioni Exo e NoExo.

	Analisi del rischio - RIGHT			
	Dinamico		Statico	
	Exo	NoExo	Exo	NoExo
Negligible (1-2)	0	0	0	0
Low risk (3-4)	30	22	35	39
Medium risk (5-6)	15	20	14	8
Very high risk (7+)	6	9	2	4



Analisi del rischio - LEFT				
	Dinamico		Statico	
	Exo	NoExo	Exo	NoExo
Negligible (1-2)	0	0	0	0
Low risk (3-4)	28	22	34	39
Medium risk (5-6)	15	12	12	6
Very high risk (7+)	8	17	5	6



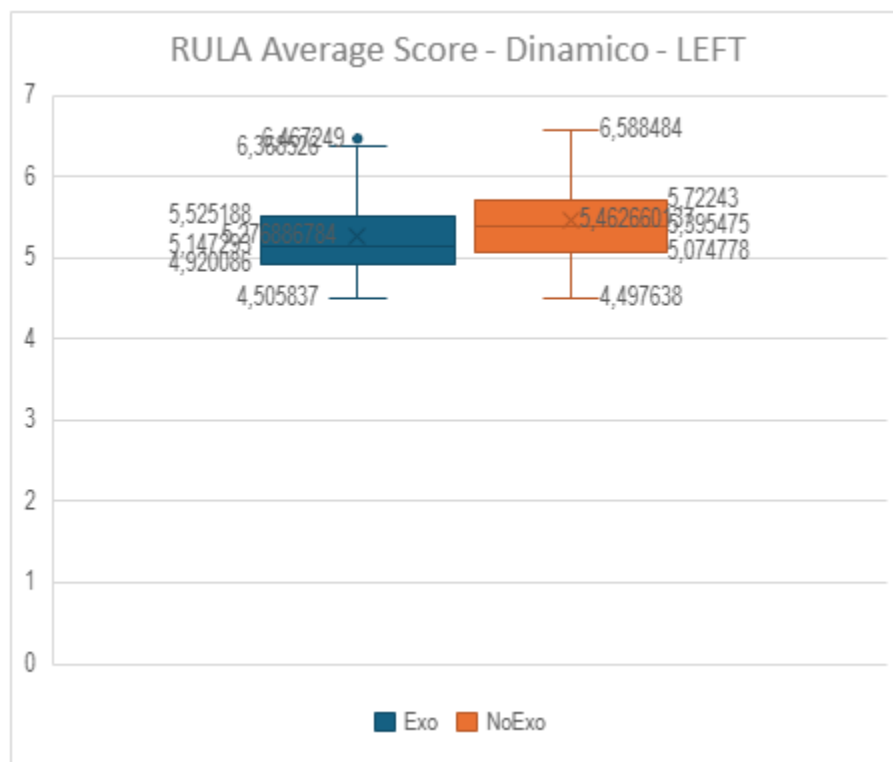
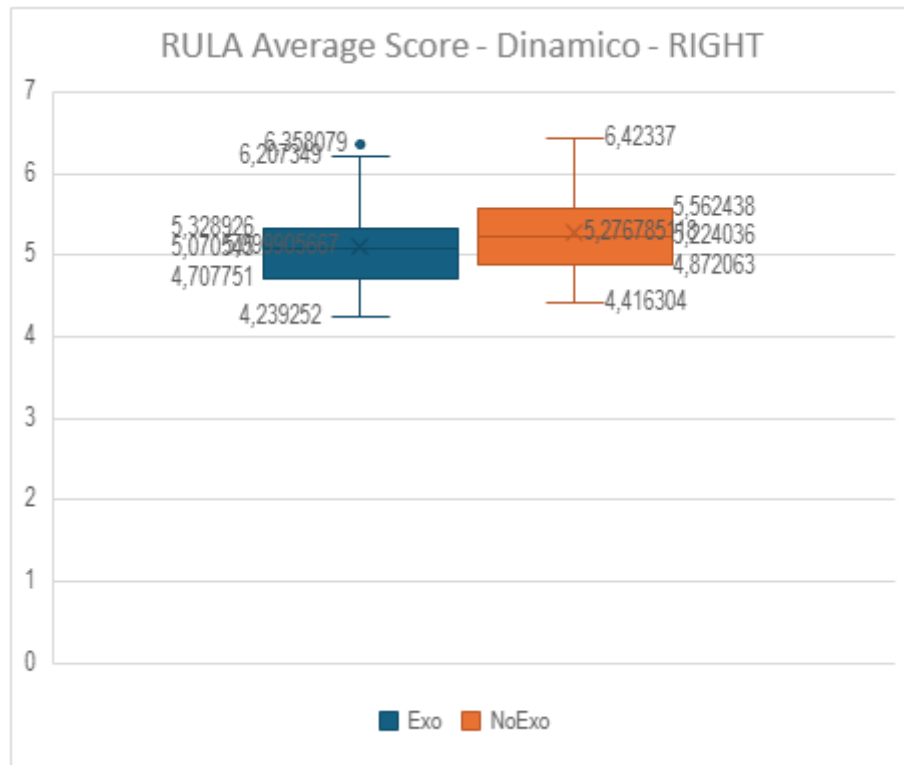
Dall'analisi delle tabelle e grafici emerge che nel test dinamico, l'utilizzo dell'esoscheletro porta a un miglioramento del rischio ergonomico. Infatti, le situazioni classificate come Very High risk (7+) diminuiscono rispetto alla condizione senza esoscheletro. Parallelamente, aumenta la percentuale di posture classificate come Low risk (3-4), mostrando un impatto positivo dell'esoscheletro.

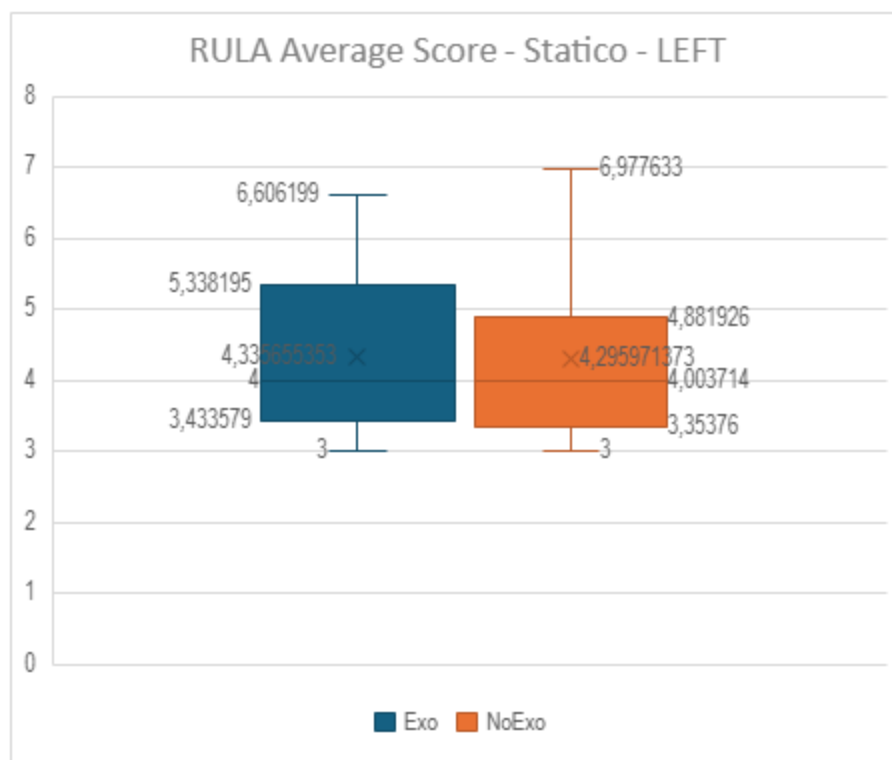
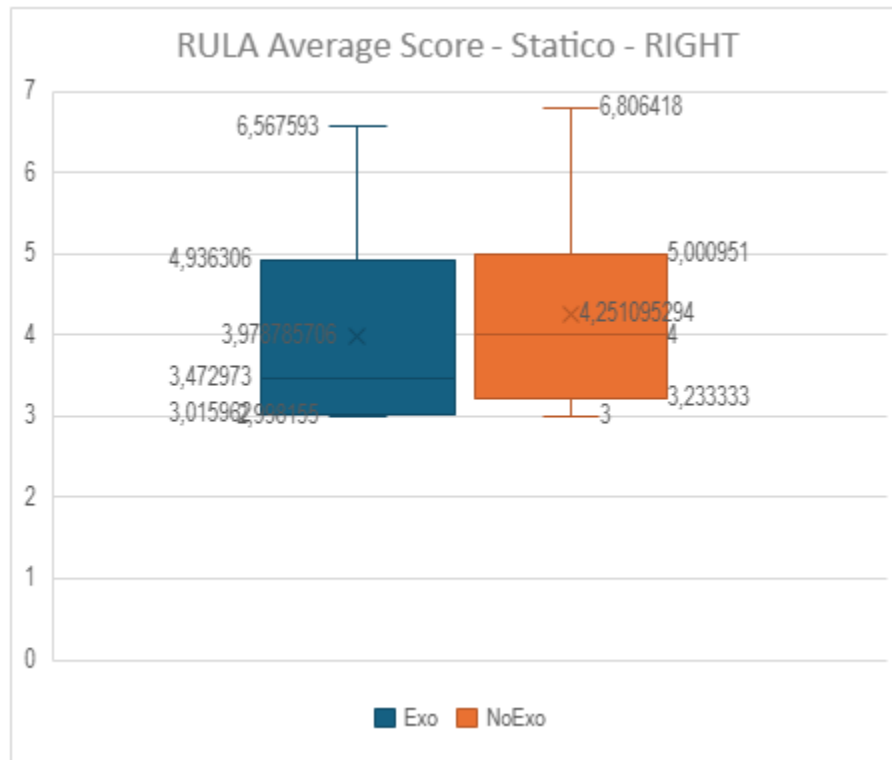
Al contrario, nel test statico, non si osserva lo stesso beneficio. Si nota addirittura nella condizione con esoscheletro una leggera diminuzione delle posture a basso rischio (Low risk) e un aumento di quelle a medio rischio (Medium risk).

Indici di rischio

Come nell'analisi precedente, sono stati analizzati gli indici di rischio RULA calcolati per ciascun test.

Questi indici sono stati suddivisi in base al tipo di task e alla parte del corpo considerata (RIGHT e LEFT), consentendo di confrontare le condizioni con esoscheletro (Exo) e senza esoscheletro (NoExo).





Dall'analisi dei diagrammi relativi ai diversi task emergono le seguenti osservazioni:

- Task dinamico
 - Per entrambi i lati del corpo (RIGHT e LEFT), si osserva una riduzione dell'indice di rischio RULA nella condizione con esoscheletro (Exo) rispetto alla condizione senza esoscheletro (NoExo).
 - Questo risultato conferma quanto già emerso dall'analisi delle classi di rischio, dimostrando che l'esoscheletro a supporto delle spalle è efficace nel ridurre le posture a rischio nel task dinamico.
- Task statico
 - A differenza del task dinamico, nel task statico si osserva un trend diverso: i valori di rischio RULA risultano leggermente più alti nella condizione Exo rispetto a NoExo soprattutto nella parte LEFT, mentre nella parte RIGHT i valori sono simili.
 - Inoltre, per la natura del task i valori di rischio sono minori rispetto al task dinamico.

2.3 Analisi statistica

L'analisi statistica rappresenta una fase cruciale per confermare o confutare le ipotesi formulate a partire dai risultati descrittivi.

Essa consente di:

- Determinare la significatività delle differenze osservate nei risultati descrittivi riducendo il rischio di errori interpretativi.
- Individuare relazioni tra variabili esplicative (es. tipo di esoscheletro, genere, task eseguito) e variabili dipendenti (es. punteggi REBA o RULA).

Attraverso un approccio quantitativo, è stato possibile valutare l'effetto dell'esoscheletro sull'indice di rischio posturale e comprendere come le variabili esplicative influenzino tali risultati.

In questa sezione vengono descritti:

- Il protocollo seguito per l'analisi statistica dei dati REBA e RULA.
- I risultati principali dell'analisi statistica.

2.3.1 Protocollo per l'analisi statistica posturale

L'analisi statistica è stata condotta separatamente per i dati relativi alla schiena (BACK) e alle spalle (SHOULDER).

La procedura seguita è simile per entrambi i casi, con l'unica differenza che, per le spalle, è stato incluso anche un confronto tra i risultati con e senza esoscheletro suddivisi per genere.

Un aspetto importante è che le analisi statistiche sono state effettuate sui risultati RIGHT o LEFT del metodo REBA o RULA, in base a criteri specifici:

- Per i dati della schiena (BACK): è stato considerato il risultato più critico (ossia il valore più alto di rischio) tra RIGHT e LEFT.
- Per i dati delle spalle (SHOULDER): sono state effettuate analisi statistiche sia per la mano dominante sia per la mano non dominante dell'utente.

Il protocollo prevedeva tre fasi principali:

Verifica preliminare dei dati

Prima di procedere con i test statistici, è stato necessario verificare:

- **Normalità dei dati**

La normalità delle distribuzioni delle variabili dipendenti è stata verificata utilizzando il test di Shapiro-Wilk, che consente di determinare se i dati seguono una distribuzione normale. Questa condizione è essenziale per l'applicazione di test parametrici come il test t di Student.

- **Omogeneità delle varianze**

L'omogeneità delle varianze tra i gruppi (es. con esoscheletro e senza esoscheletro) è stata verificata tramite il test di Levene. Questa verifica è stata necessaria per i campioni indipendenti, mentre è stata superflua per i campioni appaiati, poiché i dati sono già omogenei.

- **Individuazione di outliers**

La presenza di dati anomali è stata analizzata tramite i grafici generati durante l'analisi descrittiva.

Selezione del test statistico

Sulla base delle verifiche preliminari, è stato scelto il test statico più appropriato per il confronto tra i gruppi.

Per i campioni appaiati:

- Test t di Student: utilizzato se i dati erano normalmente distribuiti.
- Test di Wilcoxon: scelto per dati non normalmente distribuiti.

Per i campioni indipendenti:

- Test t di Student: utilizzato se i dati erano normalmente distribuiti e le varianze risultavano omogenee.
- Test di Welch: applicato se i dati erano normalmente distribuiti ma con varianze non omogenee.
- Test di Mann-Whitney U: scelto per dati non normalmente distribuiti o con varianze non omogenee.

Applicazione ai diversi punti dell'analisi

Il processo sopra descritto è stato applicato alle seguenti analisi:

A. Confronto con/senza esoscheletro sul dataset completo

Tutti i dati disponibili dei test della schiena o delle spalle sono stati utilizzati per valutare l'effetto complessivo dell'esoscheletro sull'indice di rischio posturale.

B. Confronto con/senza esoscheletro sul dataset ridotto per task

L'analisi è stata ristretta ai singoli task, separando i risultati per tipo di attività (sollevamento da 10 Kg, da 20 Kg e trasporto per la schiena; test dinamico e statico per le spalle). Ciò permette di valutare eventuali variazioni legate alla tipologia di attività.

C. Confronto con/senza esoscheletro sul dataset ridotto per brand

I dati sono stati suddivisi per marca di esoscheletro (Ottobock e Comau) per valutare differenze tra le due aziende.

D. Confronto tra brand (Ottobock vs. Comau)

L'analisi si è concentrata esclusivamente sui test eseguiti con esoscheletro (a differenza del punto C), utilizzando test per campioni indipendenti. La finalità era determinare se un brand avesse prestazioni superiori rispetto all'altro.

E. Confronto con/senza esoscheletro sul dataset ridotto per genere (solo per l'analisi SHOULDER)

Per i dati sulle spalle, è stato incluso un confronto tra uomini e donne per analizzare eventuali differenze di efficacia dell'esoscheletro in base al genere.

2.3.2 Risultati dell'analisi statistica posturale

I risultati ottenuti con la procedura precedentemente descritta sono stati organizzati in base ai punti del protocollo (A, B, C, D, E), distinguendo tra i dati relativi alla schiena (BACK) e alle spalle (SHOULDER), con ulteriori suddivisioni tra mano dominante e mano non dominante per i dati relativi alle spalle.

Risultati per la schiena (BACK)

A: Confronto con/senza esoscheletro sul dataset completo (186 osservazioni)

Gruppo	Normalità dei dati	Omogeneità delle varianze	Test utilizzato e significatività
Exo	Distribuzione normale	Varianze omogenee	Test t di Student: Risultato non significativo
NoExo	Distribuzione normale		

L'uso dell'esoscheletro non ha portato a differenze statisticamente significative nei punteggi REBA complessivi per la schiena, considerando tutti i task.

B: Confronto con/senza esoscheletro sul dataset ridotto per task (62 osservazioni per ogni task)

Per tutti e tre i task (sollevamento da 10 Kg, da 20 Kg e trasporto) i risultati statistici sono uguali e sono i seguenti.

Gruppo	Normalità dei dati	Omogeneità delle varianze	Test utilizzato e significatività
Exo	Distribuzione normale	Varianze omogenee	Test t di Student: Risultato non significativo
NoExo	Distribuzione normale		

L'esoscheletro non ha mostrato un effetto significativo sui punteggi REBA in nessuno dei task analizzati separatamente.

C: Confronto con/senza esoscheletro sul dataset ridotto per brand (96 osservazioni per Ottobock, 90 osservazioni per Comau)

Per il brand Ottobock

Gruppo	Normalità dei dati	Omogeneità delle varianze	Test utilizzato e significatività
Exo	Distribuzione normale	Varianze omogenee	Test t di Student: Risultato non significativo
NoExo	Distribuzione normale		

Per il brand Comau

Gruppo	Normalità dei dati	Omogeneità delle varianze	Test utilizzato e significatività
Exo	Distribuzione normale	Varianze omogenee	Test t di Student: Risultato significativo
NoExo	Distribuzione normale		

L'esoscheletro Comau ha mostrato un effetto significativo sull'indice di rischio REBA, mentre l'esoscheletro Ottobock non ha mostrato differenze significative.

D: Confronto tra brand (Ottobock vs Comau) sul dataset ridotto (48 osservazioni per Ottobock, 45 osservazioni per Comau)

Gruppo	Normalità dei dati	Omogeneità delle varianze	Test utilizzato e significatività
Exo Ottobock	Distribuzione normale	Varianze omogenee	Test t di Student: Risultato non significativo
Exo Comau	Distribuzione normale		

Non sono emerse differenze significative tra i due brand sull'indice di rischio REBA.

Risultati per le spalle (SHOULDER)

A: Confronto con/senza esoscheletro sul dataset completo (204 osservazioni)

Mano dominante

Gruppo	Normalità dei dati	Omogeneità delle varianze	Test utilizzato e significatività
Exo	Distribuzione normale	Varianze omogenee	Test t di Student: Risultato significativo
NoExo	Distribuzione normale		

Mano non dominante

Gruppo	Normalità dei dati	Omogeneità delle varianze	Test utilizzato e significatività
Exo	Distribuzione non normale	Varianze omogenee	Test Wilcoxon: Risultato non significativo
NoExo	Distribuzione non normale		

L'esoscheletro mostra una significatività sull'indice di rischio RULA per la mano dominante, mentre non la mostra per la mano non dominante.

B: Confronto con/senza esoscheletro sul dataset ridotto per task (102 osservazioni per ogni task)

Per il task dinamico, sia per la mano dominante che per la mano non dominante

Gruppo	Normalità dei dati	Omogeneità delle varianze	Test utilizzato e significatività
Exo	Distribuzione non normale	Varianze omogenee	Test Wilcoxon: Risultato significativo
NoExo	Distribuzione normale		

Per il task statico e la mano dominante

Gruppo	Normalità dei dati	Omogeneità delle varianze	Test utilizzato e significatività
Exo	Distribuzione non normale	Varianze omogenee	Test Wilcoxon: Risultato significativo
NoExo	Distribuzione non normale		

Mentre per il task statico e la mano non dominante

Gruppo	Normalità dei dati	Omogeneità delle varianze	Test utilizzato e significatività
Exo	Distribuzione non normale	Varianze omogenee	Test Wilcoxon: Risultato non significativo
NoExo	Distribuzione non normale		

L'esoscheletro ha mostrato effetti significativi in entrambi i task statici, mentre nei task dinamici l'effetto è stato significativo solo per la mano dominante.

C: Confronto con/senza esoscheletro sul dataset ridotto per brand (100 osservazioni per Ottobock, 104 osservazioni per Comau)

Per il brand Ottobock e la mano dominante

Gruppo	Normalità dei dati	Omogeneità delle varianze	Test utilizzato e significatività
Exo	Distribuzione non normale	Varianze omogenee	Test Wilcoxon: Risultato non significativo
NoExo	Distribuzione non normale		

Per il brand Ottobock e la mano non dominante

Gruppo	Normalità dei dati	Omogeneità delle varianze	Test utilizzato e significatività
Exo	Distribuzione normale	Varianze omogenee	Test t di Student: Risultato non significativo
NoExo	Distribuzione normale		

Per il brand Comau e la mano dominante

Gruppo	Normalità dei dati	Omogeneità delle varianze	Test utilizzato e significatività
Exo	Distribuzione non normale	Varianze omogenee	Test Wilcoxon: Risultato significativo
NoExo	Distribuzione non normale		

Per il brand Comau e la mano non dominante

Gruppo	Normalità dei dati	Omogeneità delle varianze	Test utilizzato e significatività
Exo	Distribuzione non normale	Varianze omogenee	Test Wilcoxon: Risultato non significativo
NoExo	Distribuzione non normale		

L'esoscheletro Comau ha mostrato effetti significativi per la mano dominante e non per la mano non dominante. Mentre l'esoscheletro Ottobock non ha mostrato effetti significativi per entrambi i casi.

D: Confronto tra brand (Ottobock vs Comau) sul dataset ridotto (50 osservazioni per Ottobock, 52 osservazioni per Comau)

Per la mano dominante

Gruppo	Normalità dei dati	Omogeneità delle varianze	Test utilizzato e significatività
Exo Ottobock	Distribuzione non normale	Varianze omogenee	Test di Mann-Whitney U: Risultato non significativo
Exo Comau	Distribuzione non normale		

Per la mano non dominante

Gruppo	Normalità dei dati	Omogeneità delle varianze	Test utilizzato e significatività
Exo Ottobock	Distribuzione normale	Varianze omogenee	Test di Mann-Whitney U: Risultato non significativo
Exo Comau	Distribuzione non normale		

In entrambi i casi non sono emersi effetti significativi sull'indice di rischio RULA.

E: Confronto con/senza esoscheletro sul dataset ridotto per genere (140 osservazioni per i maschi, 64 osservazioni per le femmine)

Per i maschi, sia per la mano dominante che per la mano non dominante

Gruppo	Normalità dei dati	Omogeneità delle varianze	Test utilizzato e significatività
Exo	Distribuzione non normale	Varianze omogenee	Test Wilcoxon: Risultato non significativo
NoExo	Distribuzione non normale		

Per le femmine e la mano dominante

Gruppo	Normalità dei dati	Omogeneità delle varianze	Test utilizzato e significatività
Exo	Distribuzione normale	Varianze omogenee	Test Wilcoxon: Risultato significativo
NoExo	Distribuzione non normale		

Per le femmine e la mano non dominante

Gruppo	Normalità dei dati	Omogeneità delle varianze	Test utilizzato e significatività
Exo	Distribuzione normale	Varianze omogenee	Test t di Student: Risultato significativo
NoExo	Distribuzione normale		

Per i partecipanti maschi, non sono emersi effetti significativi per entrambi le mani, mentre per le partecipanti femminili è emerso un effetto significativo per entrambi le mani.

Capitolo 3

Analisi dei questionari

Questo capitolo è dedicato all'analisi dei dati raccolti tramite i questionari compilati dagli utenti durante i test.

La prima parte descrive il processo di preparazione dei dati, inclusa l'integrazione delle risposte provenienti dai diversi questionari in un unico dataset. Successivamente, vengono presentati i risultati dell'analisi descrittiva, con tabelle e grafici per visualizzare le principali tendenze emerse. Infine, l'analisi statistica viene utilizzata per verificare la significatività tra i diversi gruppi e condizioni.

Il capitolo è suddiviso in tre sezioni principali:

- Preparazione dei dati per l'analisi: che illustra il processo di unione e organizzazione delle risposte ai questionari.
- Analisi descrittiva: in cui vengono presentati i risultati osservati e le tendenze generali.
- Analisi statistica: in cui viene valutata la significatività tra le variabili considerate.

3.1 Preparazione dei dati per l'analisi

La preparazione dei dati provenienti dai questionari ha rappresentato un passaggio fondamentale per le successive analisi descrittive e statistiche.

Le risposte dei questionari, progettati e compilati tramite Google Forms, erano inizialmente suddivise in più file Excel, uno per ciascun tipo di questionario.

Per semplificare l'elaborazione e consentire un'analisi completa, tutte le risposte sono state unite in un unico file Excel strutturato.

Il file finale, creato aggregando le informazioni provenienti da diversi questionari, contiene una serie di colonne che consentono di descrivere ogni test in modo completo e contestualizzato.

Le colonne presenti includono:

- Informazioni di base:
 - TIME: orario del test.
 - USER: identificativo univoco dell'utente.
 - GENDER, AGE, WEIGHT, HEIGHT: genere, età, peso e altezza dell'utente.
 - DOMINANT HAND: mano dominante dell'utente.
 - DISORDER: eventuali disturbi posturali dichiarati dall'utente.
 - FITNESS: grado di allenamento fisico (sedentario, moderato, agonistico).
 - FAMILIARITY: familiarità dell'utente con gli esoscheletri.
- Esoscheletro:
 - EXO: condizione (con esoscheletro o senza esoscheletro).
 - EXO TYPE: tipo di esoscheletro (schiena o spalle).
 - EXO BRAND: marca dell'esoscheletro (Ottobock o Comau).
 - LIVELLO DI ATTIVAZIONE: livello di supporto offerto dall'esoscheletro.
- Task:
 - TASK BACK e TASK SHOULDER: descrizione del task (specifico per la schiena o per le spalle).
 - TASK ORDER: ordine di esecuzione dei task per ciascun utente.

- Fatica percepita:
 - FATICA 1, FATICA 2, ..., FATICA 6: valori di fatica percepita durante le diverse fasi del test (solamente per il test del trasporto per la schiena e per il test statico per le spalle).
 - Δ FATICA: variazione complessiva della fatica.
 - FATICA MEDIA: media dei valori di fatica percepita.
- Scala di Borg:
 - BORG: valore generale dello sforzo percepito durante il test.
 - BORG SCHIENA, BORG ARTI INF., BORG SPALLE, BORG BRACCIO, BORG ARTI SUP.: valori specifici di sforzo percepito per diverse aree del corpo.
- User Experience e valutazioni finali:
 - Piacevole, Facile da apprendere, Ergonomico, ..., Utile: valutazioni soggettive su aspetti chiave dell'esperienza con l'esoscheletro.
 - Q1 Sicuro, Q2 Beneficio, ..., Q11 Piacere: risposte ai quesiti finali.
 - UEQ MEDIO e UX MEDIO: medie dei punteggi complessivi di User Experience Questionnaire e User Experience.

Grazie a questa struttura, ogni riga del file rappresenta un singolo test eseguito, contestualizzando i dati con le informazioni dell'utente, il tipo di esoscheletro testato, il task svolto e le risposte ai questionari finali.

Una volta creato il file Excel unificato, è stato necessario convertire alcuni dati originariamente in formato testuale in valori numerici, per facilitare l'elaborazione tramite codice Python. Questa operazione è stata effettuata utilizzando la seguente legenda di corrispondenza per ogni variabile testuale:

- GENDER:
 - M (maschio): 1
 - F (femmina): 2
- DOMINANT HAND:
 - Right (destra): 1
 - Left (sinistra): 2
- DISORDER:
 - NO (assenza di disturbi): 1
 - SI (presenza di disturbi): 2
- FITNESS:
 - Sedentario: 1
 - Moderato: 2
 - Agonistico: 3
- FAMILIARITY:
 - No - No (non conosce e non ha mai usato esoscheletri): 1
 - Sì - No (conosce ma non ha mai usato esoscheletri): 2
 - Sì - Sì (conosce e ha già usato esoscheletri): 3
- EXO:
 - NO (senza esoscheletro): 1
 - SI (con esoscheletro): 2
- EXO TYPE:
 - Back (schiena): 1
 - Shoulder (spalle): 2
- EXO BRAND:
 - Ottobock: 1
 - Comau: 2
- TASK BACK:
 - Sollevamento 10 kg: 1
 - Sollevamento 20 kg: 2
 - Trasporto: 3

- TASK SHOULDER:
 - Dinamico: 1
 - Statico: 2

3.2 Analisi descrittiva

L'analisi descrittiva dei questionari è stata effettuata utilizzando Python, uno strumento versatile e potente per la gestione e l'elaborazione di dati complessi.

Attraverso un codice dedicato, è stato possibile leggere, filtrare il dataset aggregato ed estrarre le informazioni rilevanti per ogni analisi e generare una serie di grafici esplicativi.

Questo tipo di analisi ha permesso di ottenere una visione d'insieme sulle percezioni degli utenti in base alle diverse condizioni sperimentali (con esoscheletro "Exo" e senza esoscheletro "NoExo"), con particolare attenzione ai task eseguiti e al tipo di esoscheletro testato (a supporto della schiena o delle spalle).

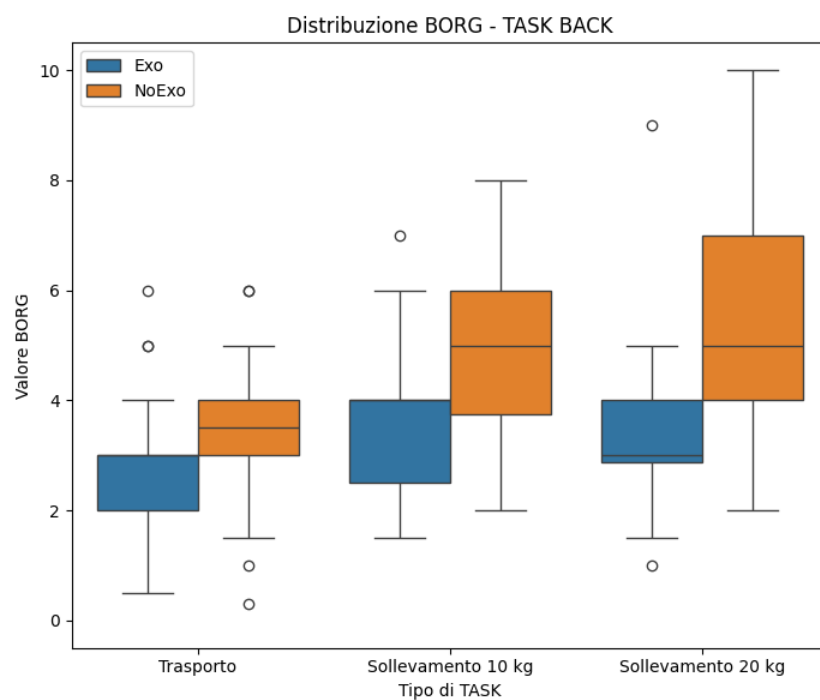
In particolare, verranno mostrati i risultati relativi:

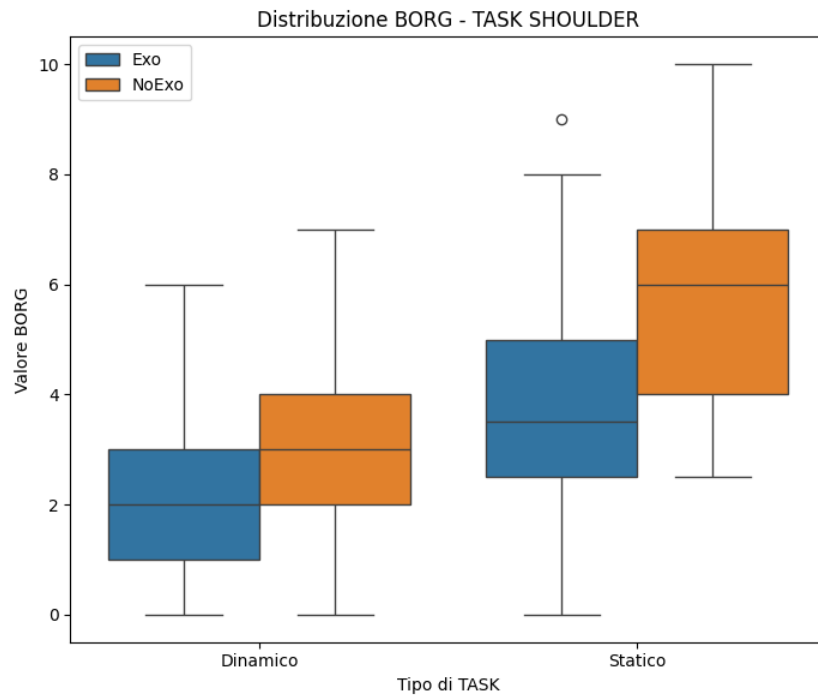
- Allo sforzo percepito attraverso la scala di Borg
- Alla fatica media e variazione di fatica
- All'User Experience Questionnaire (UEQ)
- All'User Experience (UX)

3.2.1 Analisi dello sforzo percepito attraverso la scala di Borg

I primi grafici mostrano i valori della scala di Borg, che misura lo sforzo percepito dagli utenti durante i test.

I diagrammi a scatola a baffi sono stati generati per ogni tipologia di task, confrontando le condizioni Exo e NoExo.



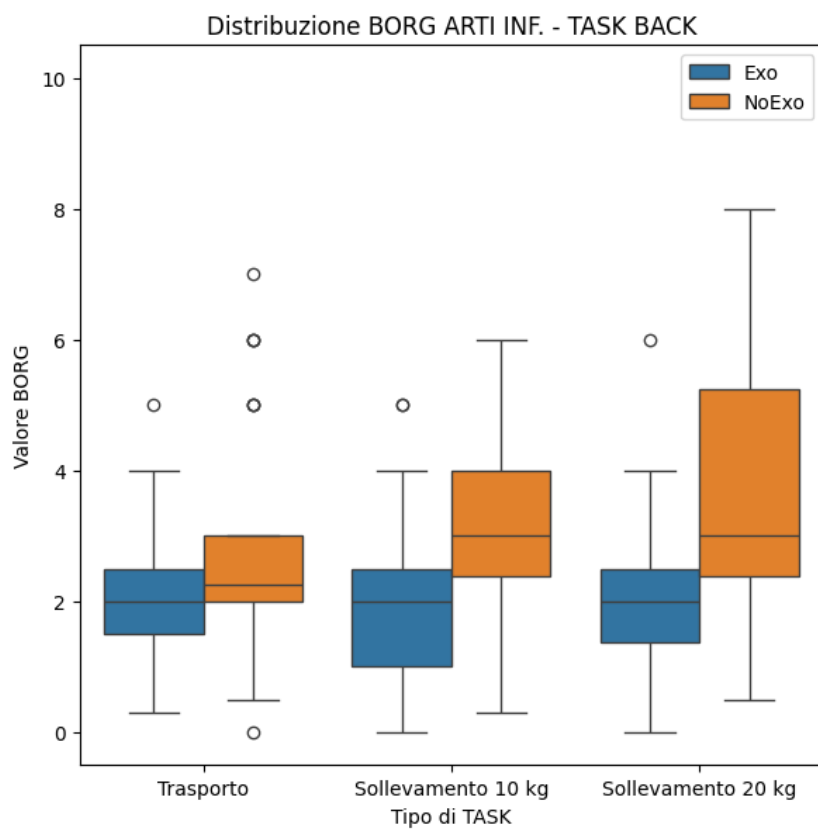
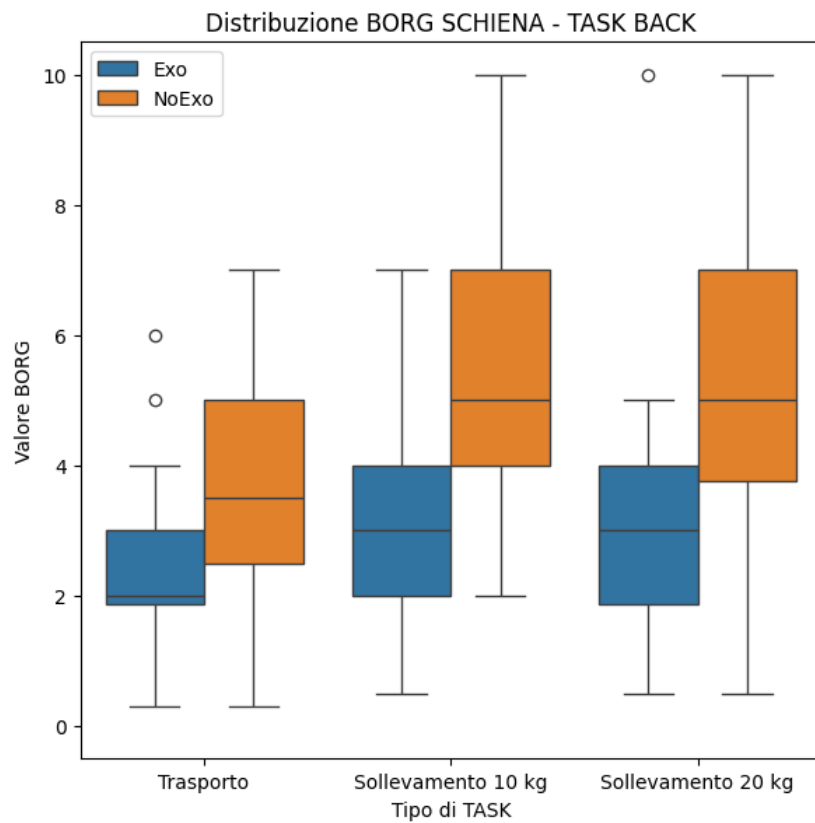


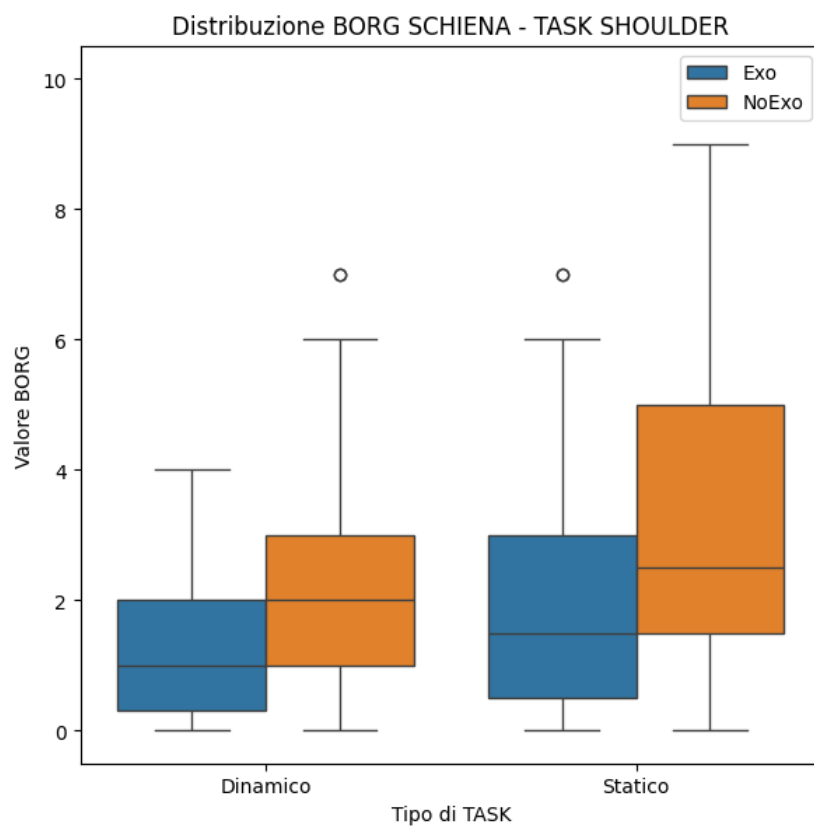
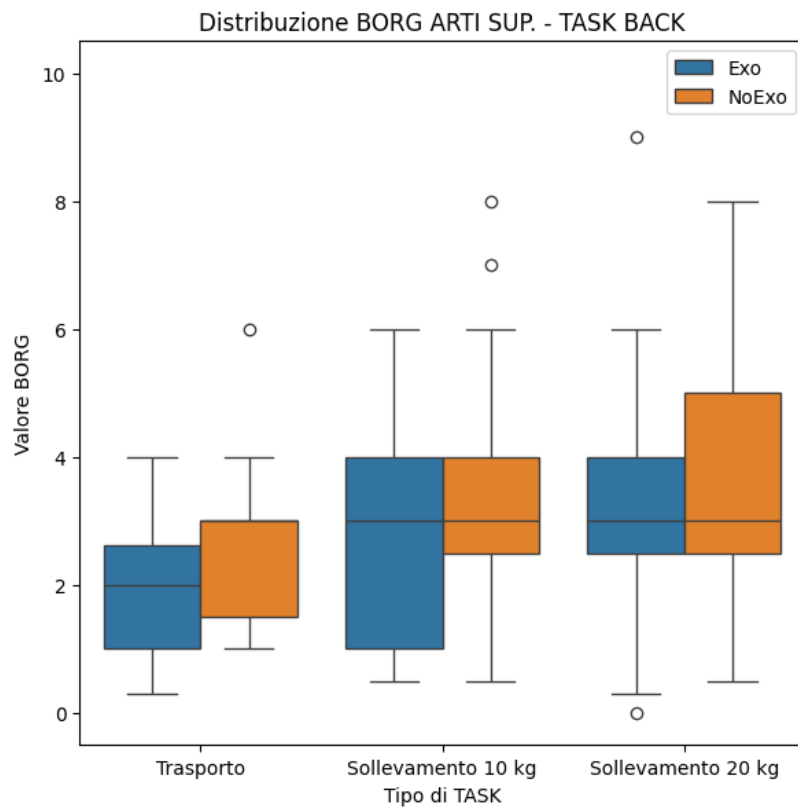
I grafici evidenziano come l'utilizzo dell'esoscheletro influisca positivamente sui valori percepiti dagli utenti, mostrando differenze significative nei punteggi. Confrontando ogni singolo task, si può notare che i guadagni maggiori li si ha nei task per la schiena e in particolare nel task di sollevamento da 20 kg. Mentre nei task per le spalle, il guadagno maggiore lo si ha nel task statico.

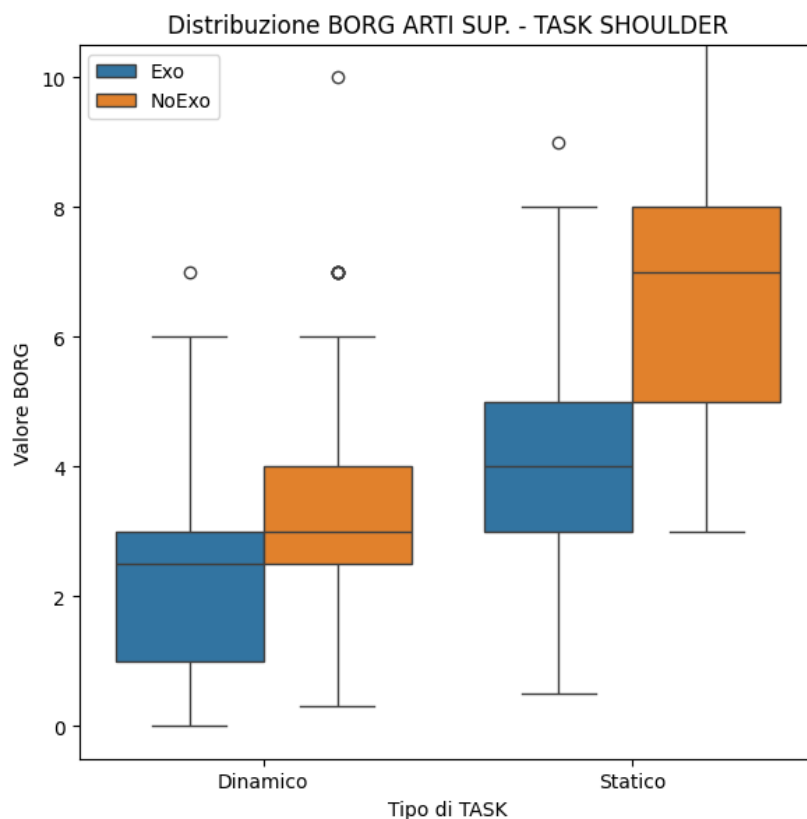
Un'analisi analoga è stata svolta per i valori di Borg relativi alle singole aree corporee:

- Borg schiena
- Borg arti inferiori
- Borg arti superiori

Anche in questo caso, i diagrammi sono stati suddivisi per tipologia di task e condizione.







I grafici mostrano che l'utilizzo dell'esoscheletro a supporto della schiena ha determinato una riduzione significativa dello sforzo sulla schiena e sugli arti inferiori, mentre il beneficio sugli arti superiori è risultato più limitato. Inoltre, analizzando i singoli task, si osserva che l'esoscheletro ha avuto un impatto maggiore nei task di sollevamento, mentre il suo effetto è stato meno evidente nel task di trasporto.

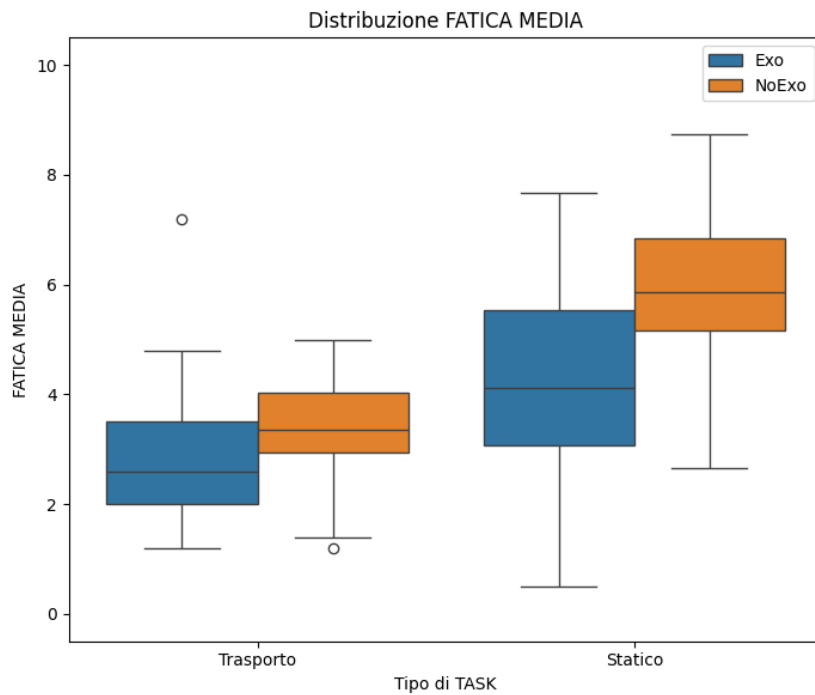
D'altra parte, l'esoscheletro a supporto delle spalle ha contribuito a ridurre lo sforzo sugli arti superiori, offrendo un beneficio inferiore per la schiena.

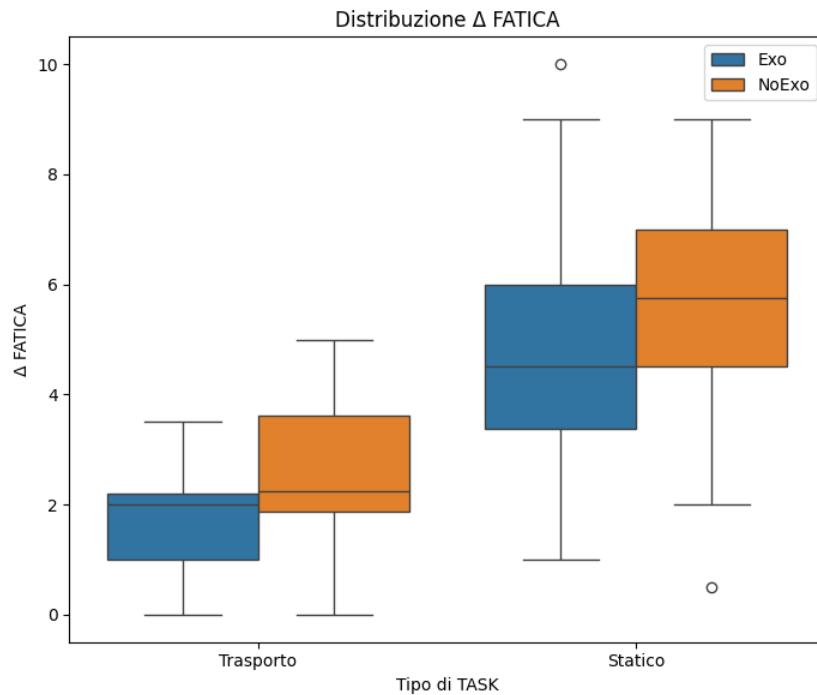
3.2.2 Analisi della fatica media e della variazione di fatica

Un altro set di diagrammi a scatola e baffi è stato generato per analizzare i valori di:

- Fatica media (FATICA MEDIA) riportata dagli utenti durante i test.
- Delta fatica (Δ FATICA), calcolata come variazione complessiva della fatica all'inizio e alla fine del test.

Poiché i valori di fatica, per il protocollo di test, venivano chiesti agli utenti solamente per il test di trasporto e per il test statico, sono stati generati solamente per questi due test.



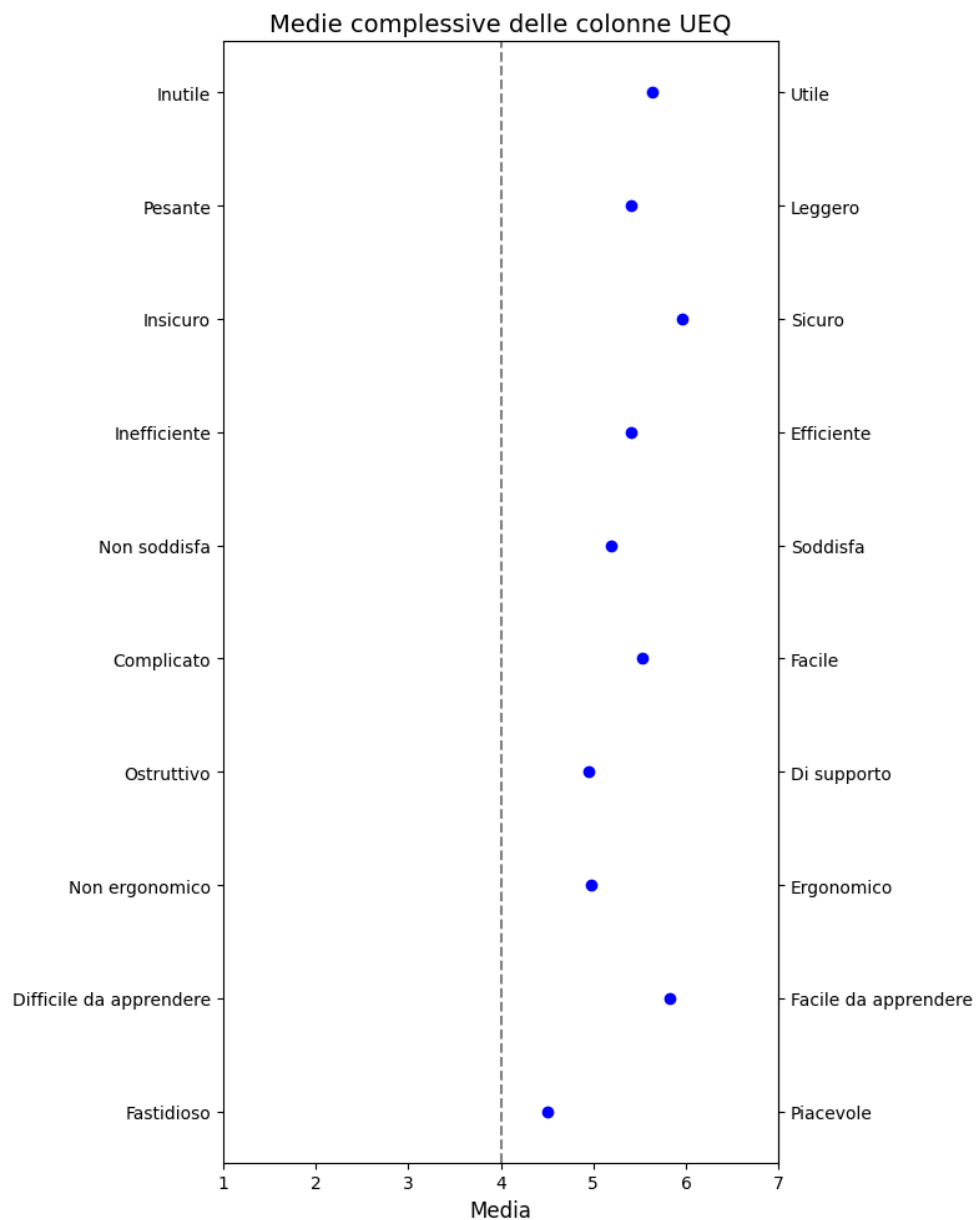


L'analisi del grafico sulla fatica media evidenzia che tra i due task considerati (trasporto e statico), il task statico è quello in cui gli utenti hanno percepito maggiore affaticamento. Tuttavia, l'utilizzo dell'esoscheletro ha contribuito a ridurre significativamente la fatica percepita, confermando il suo effetto positivo nel supportare l'utente durante attività statiche prolungate.

Analogamente, il grafico relativo alla variazione della fatica mostra che la variazione dell'affaticamento è stata più marcata nel task statico, indicando un impatto maggiore di questa attività sul livello di sforzo degli utenti. In entrambi i task, l'utilizzo dell'esoscheletro ha determinato una riduzione della variazione della fatica, suggerendo che il dispositivo possa aiutare a mantenere uno sforzo più costante e controllato nel tempo.

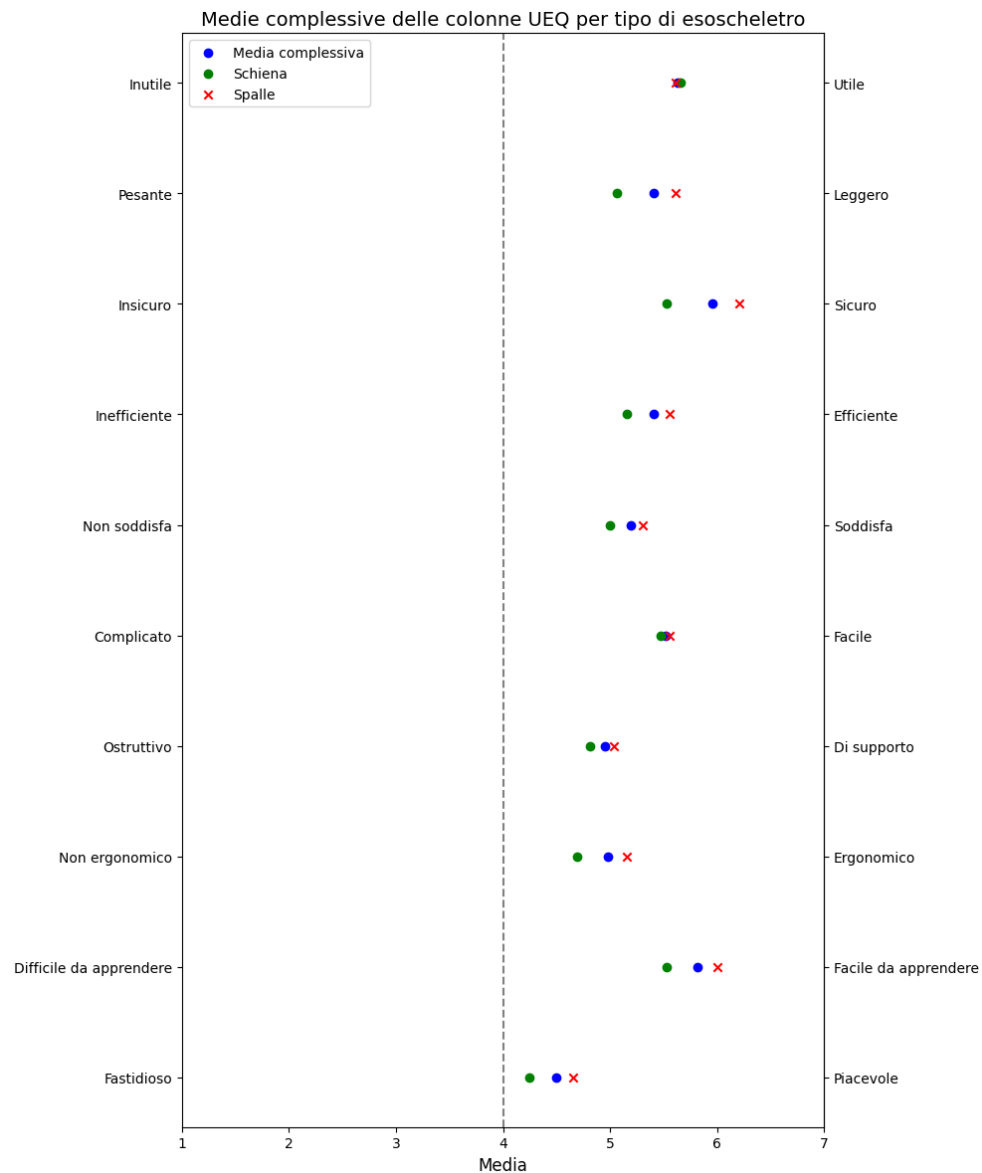
3.2.3 Analisi User Experience Questionnaire (UEQ)

Un'ulteriore analisi ha riguardato le medie delle risposte fornite dagli utenti nel User Experience Questionnaire (UEQ).



I risultati ottenuti evidenziano un'esperienza positiva da parte dell'utente in tutti gli aspetti analizzati.

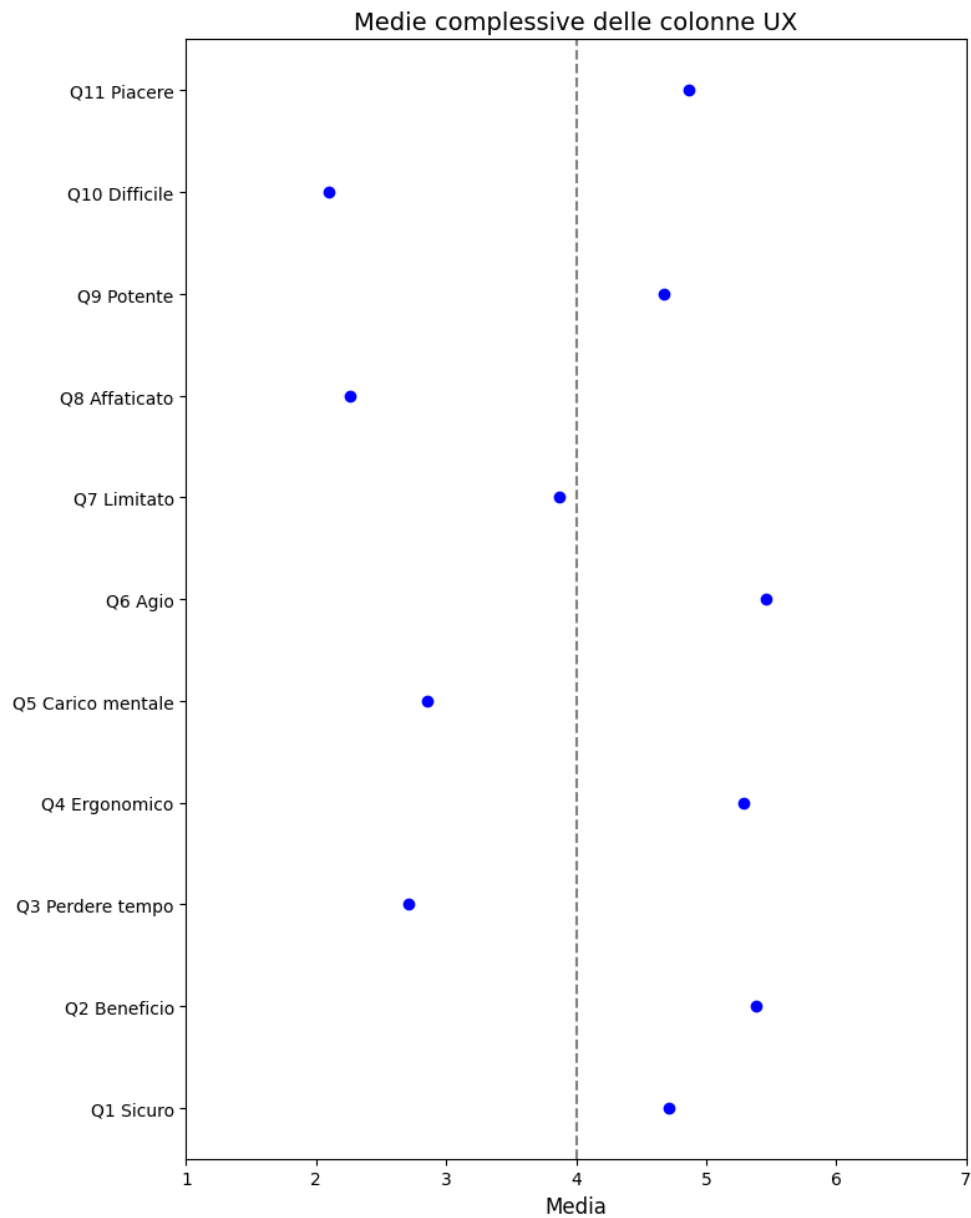
Inoltre, questo secondo grafico permette di visualizzare i risultati in relazione al tipo di esoscheletro testato. Confrontando l'esoscheletro per la schiena con l'esoscheletro per le spalle rispetto alla media globale delle risposte.



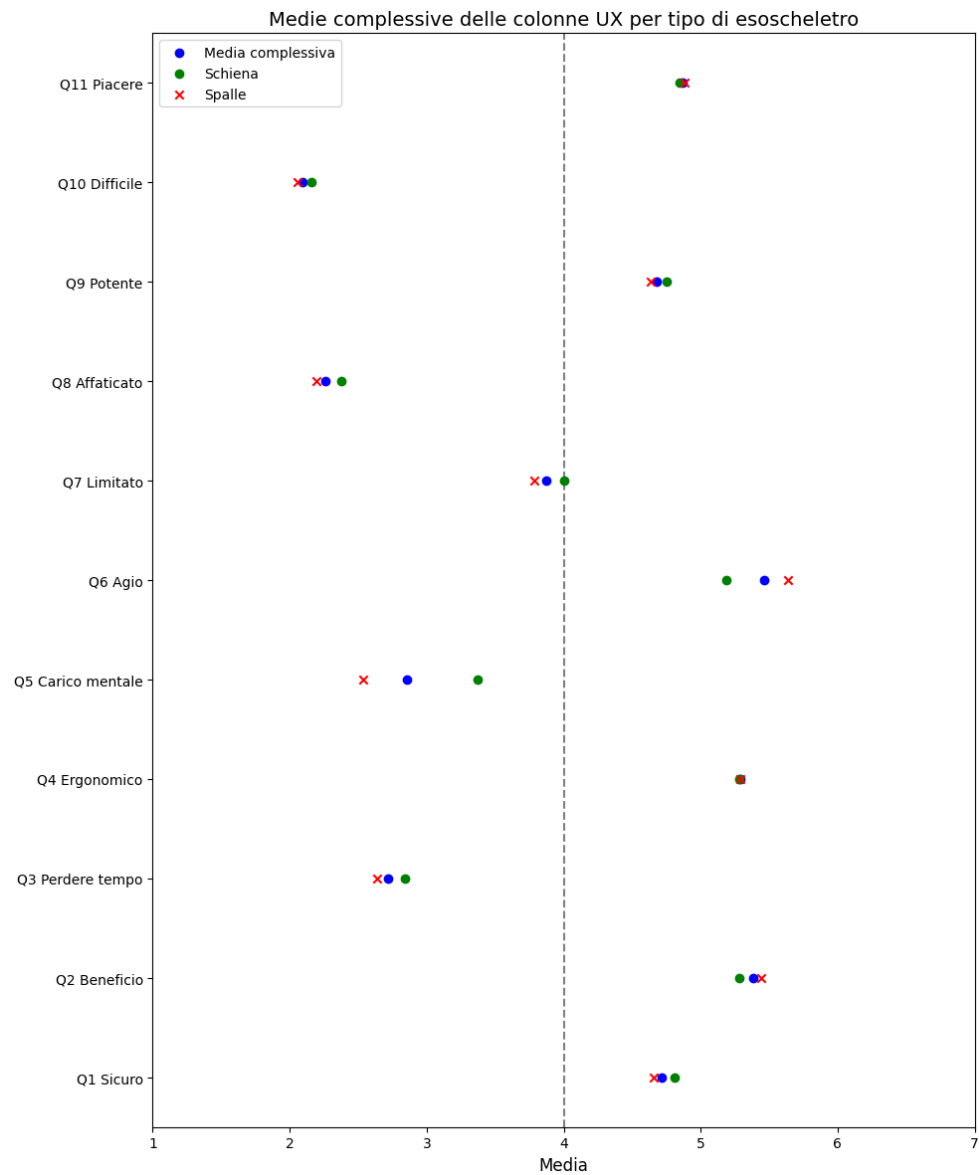
I risultati evidenziano una tendenza verso valori mediamente più alti per l'esoscheletro per le spalle, indicando un'esperienza percepita più positiva.

3.2.4 Analisi User Experience (UX)

L'analisi precedente è stata replicata per i risultati relativi all'User Experience (UX).



Il grafico seguente mostra la distribuzione delle medie per ciascun esoscheletro (schiena e spalle), mettendole a confronto con la media globale delle risposte.



Anche in questo caso, si osserva un risultato generalmente più positivo per l'esoscheletro destinato alle spalle rispetto a quello per la schiena.

3.3 Analisi statistica

Questa sezione è dedicata all'analisi statistica dei dati raccolti tramite i questionari. L'obiettivo è verificare se l'uso degli esoscheletri influisce sulle variabili legate alla percezione dello sforzo, della fatica e della user experience, tenendo conto delle diverse tipologie di esoscheletro e task eseguiti.

Questa analisi è suddivisa in due parti principali:

- Spiegazione del protocollo: descrizione della procedura utilizzata per l'analisi dei dati relativi a sforzo e fatica e ai punteggi medi di UEQ e UX.
- Presentazione dei risultati principali.

3.3.1 Protocollo per l'analisi statistica dei questionari

L'analisi statistica delle variabili legate alla percezione dello sforzo e della fatica è stata condotta seguendo un protocollo simile a quello descritto nel capitolo precedente, con alcune differenze sulle variabili analizzate.

In particolare, sono stati valutati gli effetti dell'esoscheletro sulle seguenti variabili:

- BORG, BORG SCHIENA, BORG ARTI INF, BORG ARTI SUP
- Difficoltà MEDIA

Per il task trasporto e il task statico, sono state incluse anche le variabili Δ FATICA e FATICA MEDIA.

Per l'analisi delle spalle (SHOULDER), non è stata considerata la variabile BORG ARTI INF., in quanto non disponibile per queste tipologie di task.

L'analisi statistica relativa ai punteggi medi di UEQ MEDIO e UX MEDIO si è invece concentrata sulla valutazione delle preferenze tra i due tipi di esoscheletro (Back e Shoulder). In questo caso, sono stati selezionati soltanto gli utenti che avevano testato entrambi i tipi di esoscheletro. Le variabili UEQ MEDIO e UX MEDIO sono state confrontate direttamente tra i due gruppi, utilizzando la stessa procedura e gli stessi test statistici applicati per le analisi precedenti.

3.3.2 Risultati dell'analisi statistica dei questionari

Nella prima parte di questa sezione verranno presentati i risultati relativi allo sforzo e alla fatica, mentre nella seconda parte i risultati sui punteggi medi di UEQ MEDIO e UX MEDIO.

3.3.2.1 Risultati dell'analisi di sforzo e fatica

Come nel capitolo precedente, i risultati ottenuti sono stati organizzati in base ai punti del protocollo (A, B, C, D, E), distinguendo tra i dati relativi alla schiena (BACK) e alle spalle (SHOULDER).

Risultati per la schiena (BACK)

A: Confronto con/senza esoscheletro sul dataset completo (192 osservazioni)

Analisi	Gruppo	Distribuzione	Omogeneità delle varianze	Test utilizzato e significatività
BORG	Exo	Non normale	Varianze omogenee	Test Wilcoxon: Significativo
	NoExo	Non normale		
BORG SCHIENA	Exo	Non normale	Varianze omogenee	Test Wilcoxon: Significativo
	NoExo	Non normale		
BORG ARTI INF.	Exo	Non normale	Varianze omogenee	Test Wilcoxon: Significativo
	NoExo	Non normale		
BORG ARTI SUP.	Exo	Non normale	Varianze omogenee	Test Wilcoxon: Significativo
	NoExo	Non normale		
Difficoltà MEDIA	Exo	Non normale	Varianze omogenee	Test Wilcoxon: Significativo
	NoExo	Non normale		
Δ FATICA	Exo	Normale	Varianze non omogenee	Test Welch: Significativo
	NoExo	Normale		
FATICA MEDIA	Exo	Non normale	Varianze omogenee	Test Wilcoxon: Significativo
	NoExo	Normale		

B: Confronto con/senza esoscheletro sul dataset ridotto per task (64 osservazioni per ogni task)

Per il task sollevamento da 10 Kg

Analisi	Gruppo	Distribuzione	Omogeneità delle varianze	Test utilizzato e significatività
BORG	Exo	Normale	Varianze omogenee	Test Wilcoxon: Significativo
	NoExo	Non normale		
BORG SCHIENA	Exo	Normale	Varianze omogenee	Test t di Student: Significativo
	NoExo	Normale		
BORG ARTI INF.	Exo	Non normale	Varianze omogenee	Test Wilcoxon: Significativo
	NoExo	Normale		
BORG ARTI SUP.	Exo	Non normale	Varianze omogenee	Test Wilcoxon: Non significativo
	NoExo	Non normale		
Difficoltà MEDIA	Exo	Non normale	Varianze omogenee	Test Wilcoxon: Significativo
	NoExo	Non normale		

Per il task sollevamento da 20 Kg

Analisi	Gruppo	Distribuzione	Omogeneità delle varianze	Test utilizzato e significatività
BORG	Exo	Non normale	Varianze omogenee	Test Wilcoxon: Significativo
	NoExo	Normale		
BORG SCHIENA	Exo	Non normale	Varianze omogenee	Test Wilcoxon: Significativo
	NoExo	Normale		
BORG ARTI INF.	Exo	Non normale	Varianze non omogenee	Test Wilcoxon: Significativo
	NoExo	Non normale		
BORG ARTI SUP.	Exo	Non normale	Varianze omogenee	Test Wilcoxon: Non significativo
	NoExo	Non normale		
Difficoltà MEDIA	Exo	Non normale	Varianze omogenee	Test Wilcoxon: Significativo
	NoExo	Non normale		

Per il task trasporto

Analisi	Gruppo	Distribuzione	Omogeneità delle varianze	Test utilizzato e significatività
BORG	Exo	Non normale	Varianze omogenee	Test Wilcoxon: Significativo
	NoExo	Normale		
BORG SCHIENA	Exo	Non normale	Varianze omogenee	Test Wilcoxon: Significativo
	NoExo	Normale		
BORG ARTI INF.	Exo	Normale	Varianze non omogenee	Test Wilcoxon: Non significativo
	NoExo	Non normale		
BORG ARTI SUP.	Exo	Normale	Varianze omogenee	Test Wilcoxon: Significativo
	NoExo	Non normale		
Difficoltà MEDIA	Exo	Non normale	Varianze omogenee	Test Wilcoxon: Non significativo
	NoExo	Non normale		
Δ FATICA	Exo	Normale	Varianze non omogenee	Test Welch: Significativo
	NoExo	Normale		
FATICA MEDIA	Exo	Non normale	Varianze omogenee	Test Wilcoxon: Significativo
	NoExo	Normale		

C: Confronto con/senza esoscheletro sul dataset ridotto per brand (96 osservazioni per Ottobock, 96 osservazioni per Comau)

Per il brand Ottobock

Analisi	Gruppo	Distribuzione	Omogeneità delle varianze	Test utilizzato e significatività
BORG	Exo	Non normale	Varianze non omogenee	Test Wilcoxon: Significativo
	NoExo	Non normale		
BORG SCHIENA	Exo	Normale	Varianze omogenee	Test t di Student: Significativo
	NoExo	Normale		
BORG ARTI INF.	Exo	Non normale	Varianze non omogenee	Test Wilcoxon: Significativo
	NoExo	Non normale		
BORG ARTI SUP.	Exo	Non normale	Varianze omogenee	Test Wilcoxon: Significativo
	NoExo	Non normale		
Difficoltà MEDIA	Exo	Non normale	Varianze omogenee	Test Wilcoxon: Non significativo
	NoExo	Non normale		
Δ FATICA	Exo	Normale	Varianze non omogenee	Test Welch: Significativo
	NoExo	Normale		
FATICA MEDIA	Exo	Normale	Varianze omogenee	Test t di Student: Non significativo
	NoExo	Normale		

Per il brand Comau

Analisi	Gruppo	Distribuzione	Omogeneità delle varianze	Test utilizzato e significatività
BORG	Exo	Non normale	Varianze non omogenee	Test Wilcoxon: Significativo
	NoExo	Non normale		
BORG SCHIENA	Exo	Non normale	Varianze omogenee	Test t di Student: Significativo
	NoExo	Non normale		
BORG ARTI INF.	Exo	Non normale	Varianze omogenee	Test Wilcoxon: Significativo
	NoExo	Non normale		
BORG ARTI SUP.	Exo	Non normale	Varianze omogenee	Test Wilcoxon: Non significativo
	NoExo	Non normale		
Difficoltà MEDIA	Exo	Non normale	Varianze omogenee	Test Wilcoxon: Significativo
	NoExo	Non normale		
Δ FATICA	Exo	Normale	Varianze omogenee	Test t di Student: Significativo
	NoExo	Normale		
FATICA MEDIA	Exo	Normale	Varianze omogenee	Test t di Student: Significativo
	NoExo	Normale		

D: Confronto tra brand (Ottobock vs Comau) sul dataset ridotto (48 osservazioni per Ottobock, 48 osservazioni per Comau)

Analisi	Gruppo	Distribuzione	Omogeneità delle varianze	Test utilizzato e significatività
BORG	Exo Ottobock	Non normale	Varianze omogenee	Test Mann-Whitney U: Non significativo
	Exo Comau	Non normale		
BORG SCHIENA	Exo Ottobock	Normale	Varianze omogenee	Test Mann-Whitney U: Non significativo
	Exo Comau	Non normale		
BORG ARTI INF.	Exo Ottobock	Non normale	Varianze non omogenee	Test Mann-Whitney U: Non significativo
	Exo Comau	Non normale		
BORG ARTI SUP.	Exo Ottobock	Non normale	Varianze non omogenee	Test Mann-Whitney U: Non significativo
	Exo Comau	Non normale		
Difficoltà MEDIA	Exo Ottobock	Non normale	Varianze omogenee	Test Mann-Whitney U: Non significativo
	Exo Comau	Non normale		
Δ FATICA	Exo Ottobock	Normale	Varianze omogenee	Test t di Student: Non significativo
	Exo Comau	Normale		
FATICA MEDIA	Exo Ottobock	Normale	Varianze omogenee	Test t di Student: Non significativo
	Exo Comau	Normale		

Risultati per le spalle (SHOULDER)

A: Confronto con/senza esoscheletro sul dataset completo (208 osservazioni)

Analisi	Gruppo	Distribuzione	Omogeneità delle varianze	Test utilizzato e significatività
BORG	Exo	Non normale	Varianze omogenee	Test Wilcoxon: Significativo
	NoExo	Non normale		
BORG SCHIENA	Exo	Non normale	Varianze non omogenee	Test Wilcoxon: Significativo
	NoExo	Non normale		
BORG ARTI SUP.	Exo	Non normale	Varianze omogenee	Test Wilcoxon: Significativo
	NoExo	Non normale		
Difficoltà MEDIA	Exo	Non normale	Varianze omogenee	Test Wilcoxon: Significativo
	NoExo	Non normale		
Δ FATICA	Exo	Normale	Varianze omogenee	Test t di Student: Significativo
	NoExo	Normale		
FATICA MEDIA	Exo	Normale	Varianze omogenee	Test t di Student: Significativo
	NoExo	Normale		

B: Confronto con/senza esoscheletro sul dataset ridotto per task (104 osservazioni per ogni task)

Per il task dinamico

Analisi	Gruppo	Distribuzione	Omogeneità delle varianze	Test utilizzato e significatività
BORG	Exo	Non normale	Varianze omogenee	Test Wilcoxon: Significativo
	NoExo	Non normale		
BORG SCHIENA	Exo	Non normale	Varianze non omogenee	Test Wilcoxon: Significativo
	NoExo	Non normale		
BORG ARTI SUP.	Exo	Non normale	Varianze omogenee	Test Wilcoxon: Significativo
	NoExo	Non normale		
Difficoltà MEDIA	Exo	Non normale	Varianze omogenee	Test Wilcoxon: Significativo
	NoExo	Non normale		

Per il task statico

Analisi	Gruppo	Distribuzione	Omogeneità delle varianze	Test utilizzato e significatività
BORG	Exo	Non normale	Varianze omogenee	Test Wilcoxon: Significativo
	NoExo	Non normale		
BORG SCHIENA	Exo	Non normale	Varianze omogenee	Test Wilcoxon: Significativo
	NoExo	Non normale		
BORG ARTI SUP.	Exo	Non normale	Varianze omogenee	Test Wilcoxon: Significativo
	NoExo	Normale		
Difficoltà MEDIA	Exo	Non normale	Varianze omogenee	Test Wilcoxon: Significativo
	NoExo	Non normale		
Δ FATICA	Exo	Normale	Varianze omogenee	Test t di Student: Significativo
	NoExo	Normale		
FATICA MEDIA	Exo	Normale	Varianze omogenee	Test t di Student: Significativo
	NoExo	Normale		

C: Confronto con/senza esoscheletro sul dataset ridotto per brand (104 osservazioni per Ottobock, 104 osservazioni per Comau)

Per il brand Ottobock

Analisi	Gruppo	Distribuzione	Omogeneità delle varianze	Test utilizzato e significatività
BORG	Exo	Non normale	Varianze non omogenee	Test Wilcoxon: Significativo
	NoExo	Normale		
BORG SCHIENA	Exo	Non normale	Varianze omogenee	Test Wilcoxon: Significativo
	NoExo	Non normale		
BORG ARTI SUP.	Exo	Non normale	Varianze omogenee	Test Wilcoxon: Significativo
	NoExo	Normale		
Difficoltà MEDIA	Exo	Non normale	Varianze omogenee	Test Wilcoxon: Significativo
	NoExo	Non normale		
Δ FATICA	Exo	Non normale	Varianze omogenee	Test Wilcoxon: Significativo
	NoExo	Normale		
FATICA MEDIA	Exo	Normale	Varianze omogenee	Test t di Student: Significativo
	NoExo	Normale		

Per il brand Comau

Analisi	Gruppo	Distribuzione	Omogeneità delle varianze	Test utilizzato e significatività
BORG	Exo	Normale	Varianze non omogenee	Test Wilcoxon: Significativo
	NoExo	Non normale		
BORG SCHIENA	Exo	Non normale	Varianze omogenee	Test Wilcoxon: Significativo
	NoExo	Non normale		
BORG ARTI SUP.	Exo	Non normale	Varianze omogenee	Test Wilcoxon: Significativo
	NoExo	Non normale		
Difficoltà MEDIA	Exo	Non normale	Varianze omogenee	Test Wilcoxon: Significativo
	NoExo	Non normale		
Δ FATICA	Exo	Normale	Varianze omogenee	Test t di Student: Significativo
	NoExo	Normale		
FATICA MEDIA	Exo	Normale	Varianze omogenee	Test t di Student: Significativo
	NoExo	Normale		

D: Confronto tra brand (Ottobock vs Comau) sul dataset ridotto (52 osservazioni per Ottobock, 52 osservazioni per Comau)

Analisi	Gruppo	Distribuzione	Omogeneità delle varianze	Test utilizzato e significatività
BORG	Exo Ottobock	Non normale	Varianze omogenee	Test Mann-Whitney U: Non significativo
	Exo Comau	Normale		
BORG SCHIENA	Exo Ottobock	Non normale	Varianze non omogenee	Test Mann-Whitney U: Significativo
	Exo Comau	Non normale		
BORG ARTI SUP.	Exo Ottobock	Non normale	Varianze omogenee	Test Mann-Whitney U: Non significativo
	Exo Comau	Non normale		
Difficoltà MEDIA	Exo Ottobock	Non normale	Varianze omogenee	Test Mann-Whitney U: Non significativo
	Exo Comau	Non normale		
Δ FATICA	Exo Ottobock	Non normale	Varianze omogenee	Test Mann-Whitney U: Non significativo
	Exo Comau	Normale		
FATICA MEDIA	Exo Ottobock	Normale	Varianze omogenee	Test t di Student: Non significativo
	Exo Comau	Normale		

E: Confronto con/senza esoscheletro sul dataset ridotto per genere (144 osservazioni per i maschi, 64 osservazioni per le femmine)

Per i maschi

Analisi	Gruppo	Distribuzione	Omogeneità delle varianze	Test utilizzato e significatività
BORG	Exo	Non normale	Varianze omogenee	Test Wilcoxon: Significativo
	NoExo	Non normale		
BORG SCHIENA	Exo	Non normale	Varianze omogenee	Test Wilcoxon: Significativo
	NoExo	Non normale		
BORG ARTI SUP.	Exo	Non normale	Varianze omogenee	Test Wilcoxon: Significativo
	NoExo	Non normale		
Difficoltà MEDIA	Exo	Non normale	Varianze omogenee	Test Wilcoxon: Significativo
	NoExo	Non normale		
Δ FATICA	Exo	Normale	Varianze omogenee	Test t di Student: Significativo
	NoExo	Normale		
FATICA MEDIA	Exo	Normale	Varianze omogenee	Test t di Student: Significativo
	NoExo	Normale		

Per le femmine

Analisi	Gruppo	Distribuzione	Omogeneità delle varianze	Test utilizzato e significatività
BORG	Exo	Non normale	Varianze omogenee	Test Wilcoxon: Significativo
	NoExo	Non normale		
BORG SCHIENA	Exo	Non normale	Varianze omogenee	Test Wilcoxon: Significativo
	NoExo	Non normale		
BORG ARTI SUP.	Exo	Normale	Varianze omogenee	Test Wilcoxon: Significativo
	NoExo	Non normale		
Difficoltà MEDIA	Exo	Non normale	Varianze omogenee	Test Wilcoxon: Significativo
	NoExo	Non normale		
Δ FATICA	Exo	Normale	Varianze omogenee	Test t di Student: Significativo
	NoExo	Normale		
FATICA MEDIA	Exo	Normale	Varianze omogenee	Test t di Student: Significativo
	NoExo	Normale		

3.3.2.2 Risultati dell'analisi dei punteggi medi di UEQ

MEDIO e UX MEDIO

A: Confronto back/shoulder per chi ha testato entrambi (44 osservazioni)

Analisi	Gruppo	Distribuzione	Omogeneità delle varianze	Test utilizzato e significatività
UEQ MEDIO	Back	Normale	Varianze omogenee	Test t di Student: Significativo
	Shoulder	Normale		
UX MEDIO	Back	Normale	Varianze omogenee	Test Wilcoxon: Non significativo
	Shoulder	Non normale		

Capitolo 4

Analisi dell'attivazione muscolare

In questo capitolo vengono presentati i risultati dell'analisi dell'attivazione muscolare, ottenuti dai dati raccolti attraverso gli elettromiografi FREEEMG e analizzati dall'altro gruppo di ricerca.

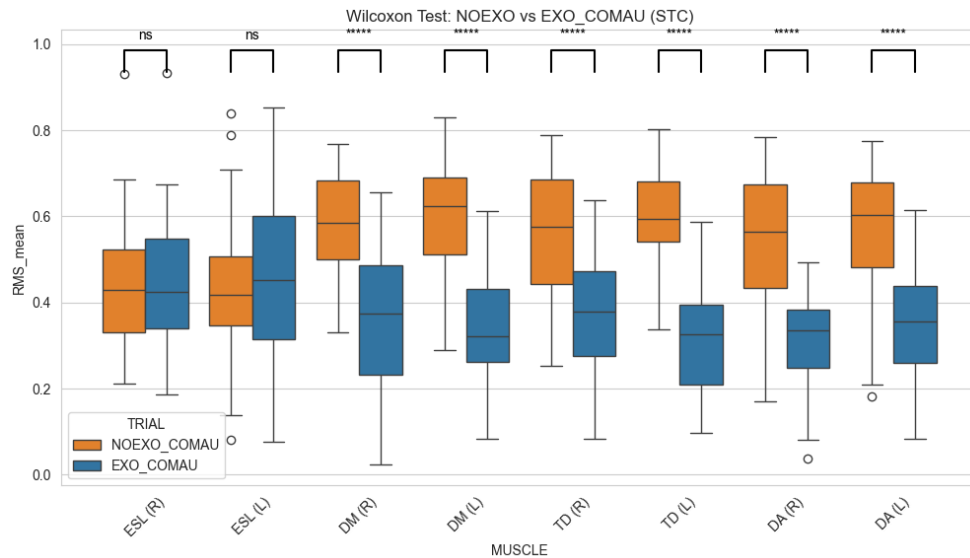
L'analisi si è concentrata nel valutare come l'utilizzo degli esoscheletri influenzi l'attività muscolare degli utenti durante il test statico per le spalle.

I risultati ottenuti vengono illustrati attraverso tre grafici, ciascuno dei quali evidenzia il livello di attivazione muscolare nei diversi muscoli coinvolti nel test, sia per la parte destra che sinistra. In particolare, vengono analizzati i seguenti muscoli:

- ESL: Schiena erector spinae
- DM: Deltoide mediale
- TD: Trapezio
- DA: Deltoide anteriore

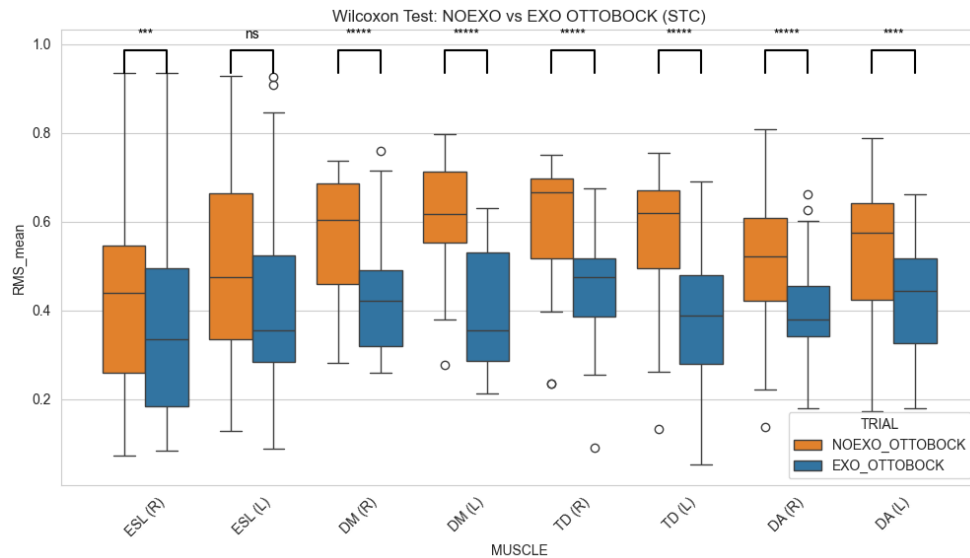
I dati raccolti consentono di confrontare la condizione senza esoscheletro (NoExo) con le condizioni in cui è stato utilizzato uno dei due esoscheletri, Comau e Ottobock.

Il primo grafico mostra il confronto tra i test senza esoscheletro e quelli eseguiti con l'esoscheletro Comau.



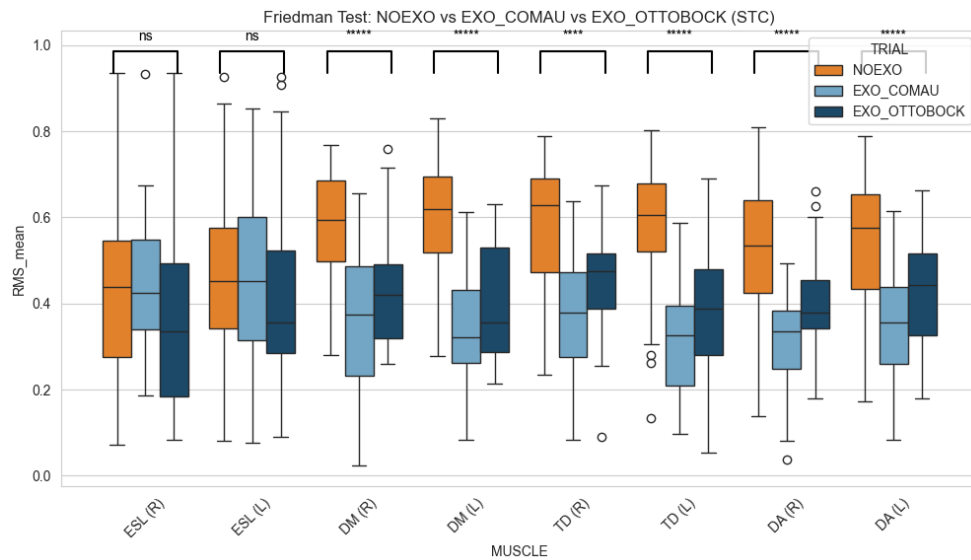
Dal grafico emerge un significativo calo dell'attivazione muscolare nei muscoli delle spalle con l'utilizzo dell'esoscheletro Comau, segnalando una riduzione dello sforzo richiesto per mantenere la postura statica. Tuttavia, lo stesso trend di riduzione non si osserva per il muscolo "Schiena erector spinae", che mostra valori di attivazione leggermente maggiori nella condizione con esoscheletro. Questo suggerisce che l'esoscheletro Comau offre un supporto efficace per le spalle, ma non influisce in modo rilevante sulla schiena durante il test statico.

Il secondo grafico analizza la stessa condizione, questa volta confrontando i test senza esoscheletro con quelli eseguiti con l'esoscheletro Ottobock.



Anche in questo caso, l'esoscheletro riduce l'attivazione muscolare delle spalle, sebbene in misura inferiore rispetto al modello Comau. Tuttavia, a differenza dell'esoscheletro Comau, il modello Ottobock mostra un effetto più marcato sulla riduzione dell'attivazione del muscolo "Schiena erector spinae", suggerendo che questo esoscheletro possa fornire un supporto migliore per la schiena rispetto al modello Comau.

Infine, il terzo grafico mette a confronto le tre condizioni NoExo, Exo Comau ed Exo Ottobock, permettendo di analizzare le differenze tra i due esoscheletri.



Dal confronto emerge che:

- L'esoscheletro Comau è più efficace nel ridurre l'attivazione muscolare delle spalle rispetto a Ottobock.
- L'esoscheletro Ottobock offre un supporto maggiore per il muscolo "Schiena erector spinae", risultando più efficace per la schiena.

Questa analisi dimostra che entrambe le soluzioni offrono benefici differenti: Comau sembra essere più adatto a ridurre il carico sui muscoli delle spalle, mentre Ottobock sembra favorire una minore attivazione della muscolatura della schiena.

Conclusione

I risultati ottenuti dall'analisi posturale indicano che l'utilizzo dell'esoscheletro non porta ad un miglioramento dell'indice di rischio ergonomico. L'unica eccezione si osserva nel task dinamico per le spalle, in cui si registra una riduzione delle posture ad alto rischio. Tuttavia, per gli altri task, i valori REBA e RULA mostrano che l'esoscheletro non ha un impatto significativo sulla postura degli utenti.

Invece, dall'analisi dei questionari emergono dati differenti. L'utilizzo dell'esoscheletro è associato a un miglioramento della percezione dello sforzo e della fatica. Gli utenti hanno riportato una minore fatica percepita e un minore sforzo fisico, suggerendo che l'esoscheletro possa offrire un certo sollievo fisico durante l'esecuzione dei task. Inoltre, dalle risposte relative all'User Experience Questionnaire (UEQ) e all'User Experience (UX), emerge una preferenza per l'esoscheletro a supporto delle spalle rispetto a quello per la schiena.

È importante sottolineare che i dati di sforzo e fatica raccolti attraverso i questionari sono soggettivi e basati sulla percezione degli utenti. Quindi, per ottenere una valutazione più completa e oggettiva sull'efficacia dell'esoscheletro, è necessario considerare anche altri dati raccolti durante i test:

- I segnali degli elettromiografi FREEEMG, che permettono di valutare in modo oggettivo l'attivazione muscolare e verificare se l'esoscheletro contribuisce effettivamente a ridurre il carico biomeccanico.
- I dati dello smartwatch per l'analisi dell'attività empatica, utili per monitorare il livello di stress dell'utente durante l'esecuzione dei task.

Se si considerano i risultati dell'ultimo capitolo, relativi all'attivazione muscolare nel task statico, emerge una significativa riduzione dell'attivazione muscolare nei muscoli della spalla. Questo risultato oggettivo conferma quanto emerso dai questionari, ovvero che l'esoscheletro a supporto delle spalle contribuisce effettivamente a ridurre lo sforzo biomeccanico.

In conclusione, questa analisi suggerisce che, sebbene l'esoscheletro non migliori l'ergonomia, può comunque ridurre lo sforzo muscolare per alcune aree anatomiche come le spalle nel task statico. Inoltre, i dati sulla user experience indicano che il dispositivo è generalmente ben tollerato dagli utenti, soprattutto nella sua versione a supporto delle spalle.

Questi risultati evidenziano il potenziale degli esoscheletri come strumento di supporto per i lavoratori, soprattutto nelle attività statiche e sopraelevate, dove la riduzione dello sforzo muscolare può contribuire a limitare l'affaticamento e migliorare il benessere dell'operatore. Se integrati in modo efficace nei processi produttivi, gli esoscheletri potrebbero rappresentare una soluzione innovativa per la prevenzione dei disturbi muscoloscheletrici e un valido alleato per ottimizzare le condizioni di lavoro nel settore industriale.

Bibliografia

Hignett S., McAtamney L. - *Rapid Entire Body Assessment (REBA)*. Appl Ergon 2000; 31: 201-5

McAtamney L., Nigel Corlett E. - *RULA: a survey method for the investigation of work-related upper limb disorders*. Appl Ergon 1993; 24:91-9.

Movella - *XSENS Motion Capture Systems*. Disponibile su: <https://www.movella.com/products/motion-capture>

Movella - *MVN User Manual*. Disponibile su: <https://www.movella.com/support/software-documentation>

BTS Bioengineering - *FREEEMG Wireless Surface Electromyography*. Disponibile su: <https://www.btsbioengineering.com/it/products/freeemg>

Comau - *MATE Exoskeletons*. Disponibile su: <https://www.comau.com/it/competencies/products-solutions/wearable-robotics-exoskeletons>

Ringraziamenti

A conclusione di questa tesi, desidero ringraziare tutte le persone che mi hanno sostenuto e accompagnato lungo il percorso universitario.

In primis, un ringraziamento speciale alla mia relatrice Alessandra Papetti e correlatrice Marianna Ciccarelli, per la loro infinita disponibilità e tempestività ad ogni mia richiesta. Grazie per il supporto, i consigli e per avermi fornito ogni materiale utile alla realizzazione di questa tesi.

Grazie a mia madre, a mio padre e a mia sorella che mi hanno aiutato a superare i momenti più difficili e che mi hanno dato la possibilità di intraprendere questo percorso universitario.

Grazie alle nonne, ai nonni, alle zie, agli zii e alle cugine che si sono sempre interessati ai miei studi, dandomi la forza di andare avanti.

Grazie ai miei colleghi di studio, per tutte le volte che mi hanno aiutato, ma soprattutto per aver condiviso insieme le gioie e le fatiche della vita universitaria.

Grazie ai miei amici per essere stati sempre presenti. A voi un ringraziamento speciale per tutti quei momenti di leggerezza e divertimento che mi avete regalato, ricordandomi l'importanza di staccare e vivere ogni esperienza con il giusto equilibrio.

Grazie infinite a tutti voi.