



UNIVERSITÀ  
POLITECNICA  
DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA  
Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Biomedica

**ANALISI DI SEGNALI  
Elettromiografici ottenuti  
Dall'impiego di un  
ESOSCHELETRO PASSIVO PER  
TEST STATICI E DINAMICI**

Analysis of electromyographic signals obtained from the use of a passive exoskeleton for static and dynamic tests

**Relatore:**  
Prof.ssa Cecilia Scoccia

**Tesi di laurea di:**  
Alessia Recchi

**Correlatori:**  
Ing. Serenella Terlizzi  
Ing. Samuele Tonelli

Anno Accademico 2023-2024

Ancona, Ottobre 2024



## **Abstract**

Gli esoscheletri passivi vengono ad oggi utilizzati per migliorare le prestazioni in ambito lavorativo e come sostegno allo svolgimento di attività sia quotidiane sia lavorative. In particolare, in questo studio analizzeremo in modo oggettivo e soggettivo l'efficacia di un esoscheletro passivo per le spalle, il Paexo Shoulder. L'analisi oggettiva è effettuata tramite sensori elettromiografici, i quali consentono di rilevare l'impegno muscolare nell'effettuare determinati movimenti e sforzi definiti dal protocollo. La valutazione soggettiva, invece, è effettuata mediante dei questionari compilati dai soggetti direttamente coinvolti nella ricerca. L'indagine ha permesso di verificare che tale esoscheletro è in grado di supportare i movimenti delle spalle e ridurre l'affaticamento muscolare, prevenendo possibili lesioni da sovraccarico muscolare in attività lavorative ripetitive. D'altra parte, i risultati evidenziano anche l'importanza di proseguire la ricerca al fine di ottimizzare le prestazioni di questi dispositivi e promuoverne l'utilizzo in diversi contesti lavorativi.



# Contents

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>11</b>
1.1	Anatomia delle spalle . . . . .	11
1.2	Disturbi muscolo-scheletrici . . . . .	18
1.3	Stato dell'arte . . . . .	21
<b>2</b>	<b>Materiali e metodi</b>	<b>24</b>
2.1	Paexo Shoulder . . . . .	24
2.2	Soggetti . . . . .	27
2.3	Elettromiografia . . . . .	27
2.4	Protocollo . . . . .	29
	2.4.1 Familiarizzazione . . . . .	32
	2.4.2 Test statico . . . . .	32
	2.4.3 Test dinamico . . . . .	32
2.5	Questionari . . . . .	34
2.6	Analisi dei dati . . . . .	35
<b>3</b>	<b>Risultati</b>	<b>37</b>
3.1	Risultati dell'analisi soggettiva . . . . .	37
3.2	Risultati dell'analisi oggettiva . . . . .	43
<b>4</b>	<b>Discussione e conclusioni</b>	<b>68</b>

## List of Figures

1	Struttura anatomica della spalla vista anteriormente e posteriormente . . . . .	11
2	legamenti della spalla . . . . .	12
3	struttura muscolare della spalla vista anteriormente . . . . .	13
4	struttura muscolare della spalla vista posteriormente . . . . .	13
5	regione scapolare della spalla . . . . .	14
6	cuffia dei rotatori della spalla . . . . .	16
7	regione deltoidea della spalla . . . . .	17
8	articolazioni della spalla . . . . .	18
9	disturbi muscolo-scheletrici . . . . .	19
10	classificazione degli esoscheletri . . . . .	22
11	Paexo Shoulder . . . . .	24
12	Caratteristiche del Paexo Shoulder . . . . .	26
13	Erector spinae longissimus e trapezius descendens . . . . .	28
14	Deltoideus medius e deltoideus anterior . . . . .	28
15	Elettromiografo wireless FREEEMG 1000 . . . . .	29
16	G-Sensor . . . . .	30
17	Empatica . . . . .	30
18	Xsens . . . . .	30
19	vestizione senza esoscheletro . . . . .	31
20	vestizione con esoscheletro . . . . .	31
21	test statico senza esoscheletro . . . . .	33
22	test statico con esoscheletro . . . . .	33
23	test dinamico con esoscheletro con posizionamento frontale . . .	33
24	test dinamico con esoscheletro con posizionamento overhead . . .	33
25	scala di Borg CR10 . . . . .	34
26	EMG del right erector spinae longissimus del soggetto 1 senza l'esoscheletro sovrapposto a quello ottenuto con l'esoscheletro durante il test statico . . . . .	43
27	EMG del left erector spinae longissimus del soggetto 1 senza l'esoscheletro sovrapposto a quello ottenuto con l'esoscheletro durante il test statico . . . . .	44
28	EMG del right deltoideus medius del soggetto 1 senza l'esoscheletro sovrapposto a quello ottenuto con l'esoscheletro durante il test statico . . . . .	44
29	EMG del left deltoideus medius del soggetto 1 senza l'esoscheletro sovrapposto a quello ottenuto con l'esoscheletro durante il test statico . . . . .	45
30	EMG del right trapezius descendens del soggetto 3 senza l'esoscheletro sovrapposto a quello ottenuto con l'esoscheletro durante il test dinamico . . . . .	45
31	EMG del left trapezius descendens del soggetto 1 senza l'esoscheletro sovrapposto a quello ottenuto con l'esoscheletro durante il test dinamico . . . . .	46

32	EMG del right deltoideus anterior del soggetto 3 senza l'esoscheletro sovrapposto a quello ottenuto con l'esoscheletro durante il test dinamico . . . . .	46
33	EMG del left deltoideus anterior del soggetto 1 senza l'esoscheletro sovrapposto a quello ottenuto con l'esoscheletro durante il test dinamico . . . . .	47
34	RMS del right erector spinae longissimus del soggetto 2 senza l'esoscheletro sovrapposto a quello ottenuto con l'esoscheletro durante il test statico . . . . .	53
35	RMS del left erector spinae longissimus del soggetto 2 senza l'esoscheletro sovrapposto a quello ottenuto con l'esoscheletro durante il test statico . . . . .	54
36	RMS del right deltoideus medius del soggetto 2 senza l'esoscheletro sovrapposto a quello ottenuto con l'esoscheletro durante il test statico . . . . .	54
37	RMS del left deltoideus medius del soggetto 2 senza l'esoscheletro sovrapposto a quello ottenuto con l'esoscheletro durante il test statico . . . . .	55
38	RMS del right trapezius descendens del soggetto 2 senza l'esoscheletro sovrapposto a quello ottenuto con l'esoscheletro durante il test statico . . . . .	55
39	RMS del left trapezius descendens del soggetto 2 senza l'esoscheletro sovrapposto a quello ottenuto con l'esoscheletro durante il test statico . . . . .	56
40	RMS del right deltoideus anterior del soggetto 6 senza l'esoscheletro sovrapposto a quello ottenuto con l'esoscheletro durante il test statico . . . . .	56
41	RMS del left deltoideus anterior del soggetto 2 senza l'esoscheletro sovrapposto a quello ottenuto con l'esoscheletro durante il test statico . . . . .	57
42	RMS del right erector spinae longissimus del soggetto 1 senza l'esoscheletro sovrapposto a quello ottenuto con l'esoscheletro durante il test dinamico . . . . .	57
43	RMS del left erector spinae longissimus del soggetto 1 senza l'esoscheletro sovrapposto a quello ottenuto con l'esoscheletro durante il test dinamico . . . . .	58
44	RMS del right deltoideus medius del soggetto 1 senza l'esoscheletro sovrapposto a quello ottenuto con l'esoscheletro durante il test dinamico . . . . .	58
45	RMS del left deltoideus medius del soggetto 1 senza l'esoscheletro sovrapposto a quello ottenuto con l'esoscheletro durante il test dinamico . . . . .	59
46	RMS del right trapezius descendens del soggetto 1 senza l'esoscheletro sovrapposto a quello ottenuto con l'esoscheletro durante il test dinamico . . . . .	59

47	RMS del left trapezius descendens del soggetto 1 senza l'esoscheletro sovrapposto a quello ottenuto con l'esoscheletro durante il test dinamico . . . . .	60
48	RMS del right deltoideus anterior del soggetto 4 senza l'esoscheletro sovrapposto a quello ottenuto con l'esoscheletro durante il test dinamico . . . . .	60
49	RMS del left deltoideus anterior del soggetto 1 senza l'esoscheletro sovrapposto a quello ottenuto con l'esoscheletro durante il test dinamico . . . . .	61



## List of Tables

1	Componenti del Paexo Shoulder . . . . .	25
2	Informazioni sui soggetti . . . . .	27
3	Risultati del questionario intermedio per il test statico degli uomini: percentuali che esprimono le differenze nelle valutazioni dei partecipanti dopo aver svolto il test con e senza esoscheletro . . .	38
4	Risultati del questionario intermedio per il test statico delle donne: percentuali che esprimono le differenze nelle valutazioni dei partecipanti dopo aver svolto il test con e senza esoscheletro . . . . .	38
5	Risultati del questionario intermedio per il test dinamico degli uomini: percentuali che esprimono le differenze nelle valutazioni dei partecipanti dopo aver svolto il test con e senza esoscheletro .	39
6	Risultati del questionario intermedio per il test dinamico delle donne: percentuali che esprimono le differenze nelle valutazioni dei partecipanti dopo aver svolto il test con e senza esoscheletro .	39
7	Risultati del questionario finale delle donne: valutazioni fornite dai partecipanti dopo aver svolto entrambi i test con e senza esoscheletro. Viene calcolata media $\pm$ deviazione standard ( $\sigma$ ) dei punteggi assegnati ad ogni aggettivo e dei punteggi dati da ogni soggetto . . . . .	40
8	Risultati del questionario finale degli uomini: valutazioni fornite dai partecipanti dopo aver svolto entrambi i test con e senza esoscheletro. Viene calcolata media $\pm$ deviazione standard ( $\sigma$ ) dei punteggi assegnati ad ogni aggettivo e dei punteggi dati da ogni soggetto . . . . .	41
9	Fatigue Scores registrati ogni 30" di tutti i soggetti, sia con indosso l'esoscheletro sia senza di esso . . . . .	42
10	variazione in percentuale della massima contrazione muscolare che si evidenzia negli uomini se si indossa o non si indossa l'esoscheletro durante lo svolgimento del test statico . . . . .	48
11	variazione in percentuale della massima contrazione muscolare che si evidenzia nelle donne se si indossa o non si indossa l'esoscheletro durante lo svolgimento del test statico . . . . .	49
12	variazione in percentuale della massima contrazione muscolare che si evidenzia negli uomini se si indossa o non si indossa l'esoscheletro durante lo svolgimento del test dinamico . . . . .	50
13	variazione in percentuale della massima contrazione muscolare che si evidenzia nelle donne se si indossa o non si indossa l'esoscheletro durante lo svolgimento del test dinamico . . . . .	51
14	media $\pm$ deviazione standard degli RMS durante il test statico degli uomini e percentuale che esprime la differenza tra i risultati ricavati dall'esecuzione del test senza l'esoscheletro e con esso . .	62
15	media $\pm$ deviazione standard degli RMS durante il test statico delle donne e percentuale che esprime la differenza tra i risultati ricavati dall'esecuzione del test senza l'esoscheletro e con esso . .	62

16	media $\pm$ deviazione standard degli RMS durante il test dinamico degli uomini e percentuale che esprime la differenza tra i risultati ricavati dall'esecuzione del test senza l'esoscheletro e con esso . .	63
17	media $\pm$ deviazione standard degli RMS durante il test dinamico delle donne e percentuale che esprime la differenza tra i risultati ricavati dall'esecuzione del test senza l'esoscheletro e con esso . .	63
18	media $\pm$ deviazione standard degli RMS durante il test statico del soggetto 1 e percentuale che esprime la differenza tra i risultati ricavati dall'esecuzione del test senza l'esoscheletro e con esso . .	64
19	media $\pm$ deviazione standard degli RMS durante il test dinamico del soggetto 1 e percentuale che esprime la differenza tra i risultati ricavati dall'esecuzione del test senza l'esoscheletro e con esso . .	65
20	t-test sul test statico uomini . . . . .	66
21	t-test sul test statico donne . . . . .	66
22	t-test sul test dinamico uomini . . . . .	67
23	t-test sul test dinamico donne . . . . .	67



# 1 Introduzione

Con questo studio si sono voluti indagare gli effetti dell'utilizzo di un esoscheletro passivo, il Paexo Shoulder (Ottobock SE &Co. KGaA, Duderstadt, Germania), in lavoratori che svolgono mansioni che prevedono di mantenere le braccia alzate. Il termine "disturbo muscolo-scheletrico" si riferisce ad un'ampia varietà di affezioni dell'apparato locomotore che possono interessare diverse strutture e sistemi del nostro organismo. Spesso queste problematiche colpiscono lavoratori che svolgono attività di sollevamento, ripetitive o che mantengono posture scorrette durante i loro turni di lavoro [29]. Le azioni più frequentemente attuate per limitare l'insorgenza e la sintomatologia dei disturbi muscolo-scheletrici sono la formazione dei nuovi lavoratori e gli interventi ergonomici per contrastare il rischio da sovraccarico biomeccanico. Tra queste azioni, l'uso di un supporto esterno chiamato esoscheletro è in forte aumento, ma non è ancora molto diffuso a causa di molteplici ragioni, prima fra tutte la mancanza di consapevolezza e accettazione [2]. Gli esoscheletri permettono replicare la cinematica dell'arto e, quindi, di supportare i suoi movimenti; è possibile controllare opportunamente la posizione e l'orientamento dei segmenti articolari, in accordo con i gradi di libertà attivati [16].

## 1.1 Anatomia delle spalle

L'articolazione della spalla unisce l'arto superiore al tronco, fungendo da punto di giunzione tra la testa dell'omero, la clavicola e la cavità glenoidea della scapola [3].

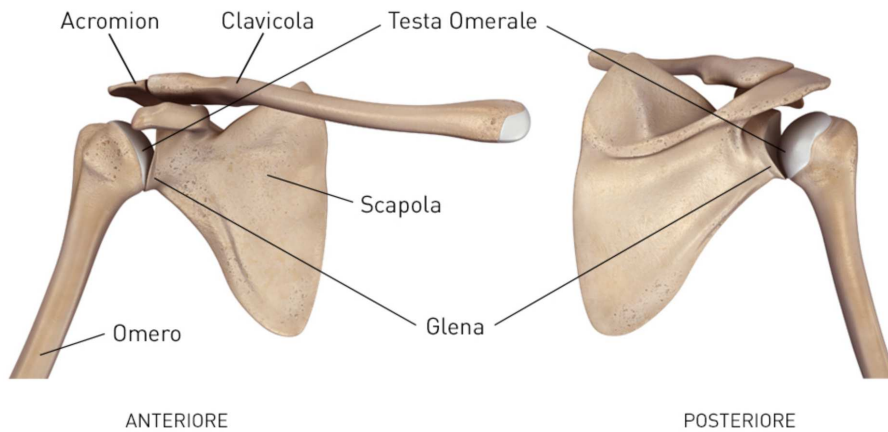


Figure 1: Struttura anatomica della spalla vista anteriormente e posteriormente

L'omero è un osso lungo, e costituisce lo scheletro del braccio; si articola nell'estremità prossimale con la scapola e in quella distale con radio e ulna.

L'estremità prossimale è ingrossata e costituisce la testa dell'omero, mentre l'estremità distale si presenta larga e appiattita lungo il piano frontale; lateralmente si ha il condilo omerale, che si articola con il radio, mentre sul lato mediale si trova la troclea che si articola con l'ulna.

La clavicola è anch'essa un osso lungo, la cui forma ricorda una "S", che si estende trasversalmente davanti alla prima costa e unisce il manubrio dello sterno all'acromion della scapola.

La scapola è un osso piatto e sottile di forma triangolare, la cui faccia anteriore si adatta alla parte posteriore della gabbia toracica, mentre la faccia posteriore presenta una cresta, detta spina della scapola, che termina in un robusto processo detto acromion dove si articola con la clavicola. L'articolazione con l'omero avviene invece mediante la cavità glenoidea, avente sede nel vertice laterale del triangolo. [3][16]

La spalla è costituita da:

- Due superfici articolari, una appartenente all'omero e una alla scapola
- Capsula articolare, fondamentale per mantenere in sede l'articolazione
- Cartilagine articolare, la quale riveste le superfici articolari
- Legamenti, che stabilizzano l'articolazione
- Borse sinoviali, le quali facilitano lo scorrimento dei muscoli
- Tendini e muscoli, fondamentali per il movimento e la stabilità
- Nervi, che consentono la trasmissione dei segnali per il movimento e la sensazione.

[13]

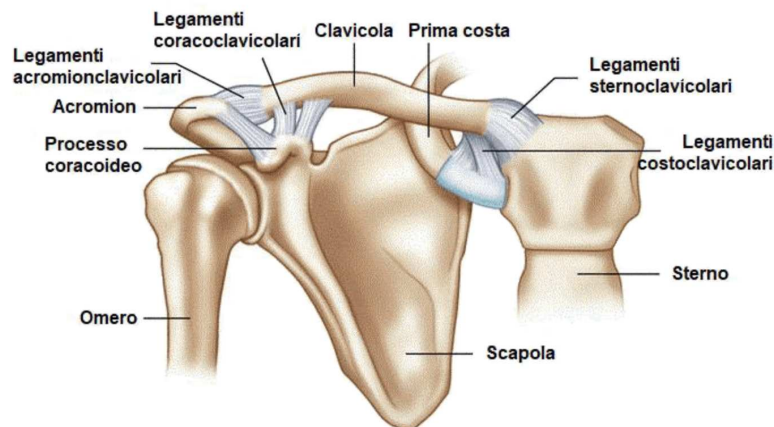


Figure 2: legamenti della spalla

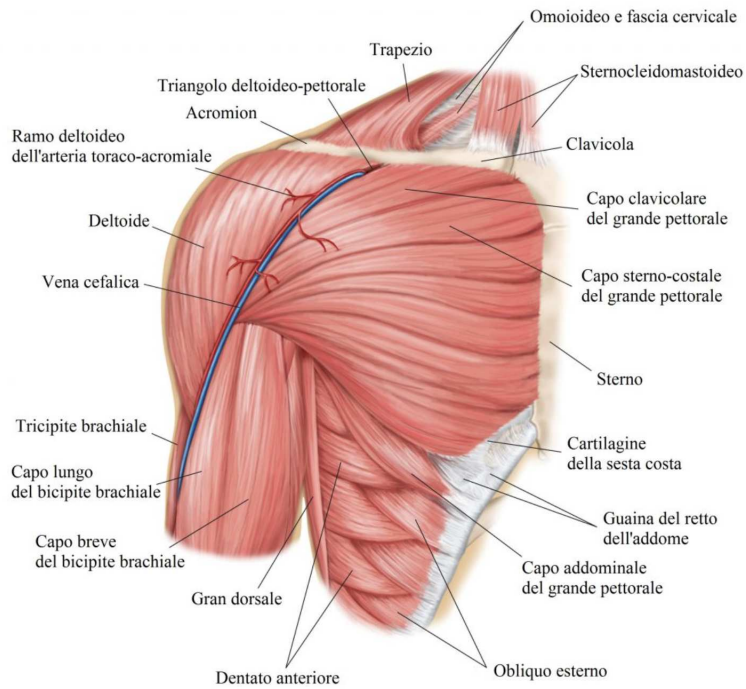


Figure 3: struttura muscolare della spalla vista anteriormente

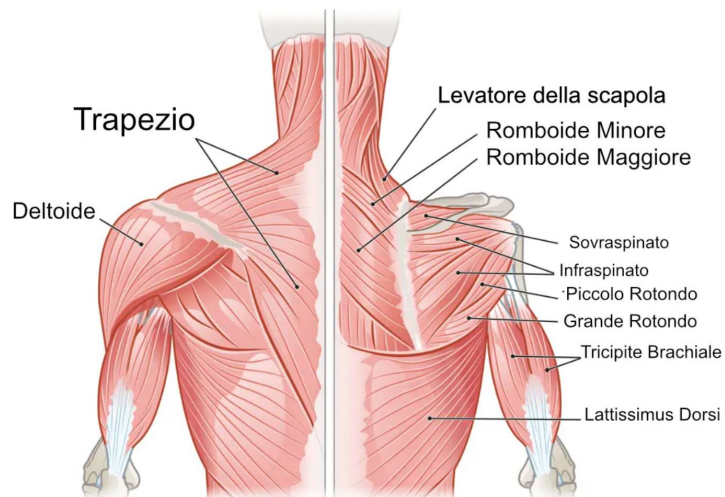


Figure 4: struttura muscolare della spalla vista posteriormente

Nella spalla distinguiamo una regione posteriore, o scapolare, una regione deltoidea, che corrisponde alla parte prominente della spalla, una regione anteriore, o sottoclavicolare, e una regione inferiore o ascellare. Le parti molli delimitano la loggia o cavità ascellare, attraverso la quale passano i vasi e i nervi destinati alla parte libera dell'arto superiore [3].

La regione scapolare è la parte posteriore della spalla ed è delimitata dai margini superiore e mediale della scapola, dal muscolo grande rotondo e dal margine posteriore del muscolo deltoide. Ha forma quadrangolare. Tra il terzo superiore e i due terzi inferiori si apprezza il rilievo trasversale del margine posteriore della spina della scapola. La cute è spessa, mobile, scarsamente dotata di peli. Il sottocutaneo è suddiviso in uno strato superficiale e uno strato profondo, più lasso, che facilita i movimenti della scapola. In corrispondenza del margine posteriore della spina si possono ritrovare borse sierose. Lo stato osteomuscolare sottostante comprende la scapola, i muscoli che la rivestono posteriormente e anteriormente, e le relative fasce. La superficie profonda di questo strato è rivolta verso la loggia ascellare e ne rappresenta la parete posteriore. Tolto il sottocutaneo, si rileva, tra il terzo superiore e i due terzi inferiori della regione, il margine posteriore della spina della scapola. La spina divide la faccia posteriore della scapola in due fosse, sovraspinata e sottospinata (o infraspinata), occupate ciascuna da muscoli disposti in due strati, uno superficiale e uno profondo, rivestiti dalle rispettive fasce [3].

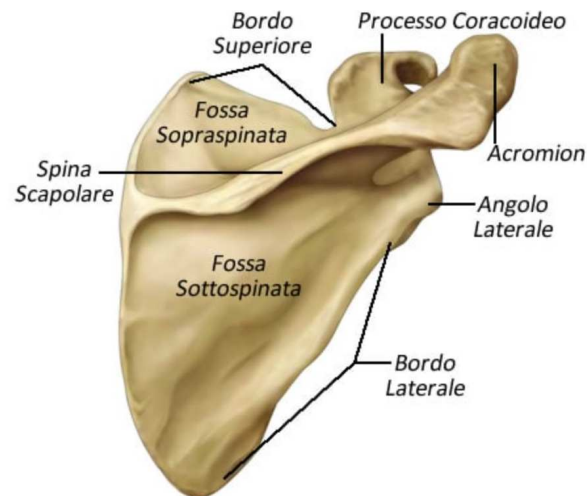


Figure 5: regione scapolare della spalla

Sotto al muscolo trapezio si trova la fascia sovraspinata, che, prendendo attacco ai margini della fossa sovraspinata, delimita una loggia osteofibrosa che accoglie il muscolo sovraspinato, circondato da tessuto adiposo, le arterie trasversa della scapola e trasversa del collo, il nervo sovrascapolare e vasi lin-

fatici.

Il muscolo sovraspinato, piccolo e di forma conoide, originato dalla fossa sovraspinata si dirige lateralmente per inserirsi alla grande tuberosità dell'omero. È innervato dal nervo sovrascapolare.

L'arteria trasversa della scapola, ramo della succlavia, penetra nella fossa passando sopra il legamento trasverso superiore della scapola, accompagnata dal nervo sovrascapolare.

Nella fossa sottospinata lo strato superficiale dei muscoli è formato da una porzione dei muscoli deltoide e grande dorsale e lo strato profondo dai muscoli sottospinato (o infraspinato), piccolo e grande rotondo.

Il muscolo deltoide è rappresentato soltanto dalla porzione che si inserisce sulla spina della scapola.

Il muscolo grande dorsale è presente con i fasci che si dispongono dietro l'angolo inferiore della scapola. Asportando i muscoli deltoide e grande dorsale si mette in evidenza tutta la fascia sottospinata, una lamina fibrosa robusta che si fissa ai margini della fossa e forma la loggia sottospinata (o infraspinata) che contiene i muscoli sottospinato e piccolo rotondo, le arterie circonflessa e trasversa della scapola ed il nervo sovrascapolare. I vasi linfatici di questa fossa sono tributari dei linfonodi ascellari.

Il muscolo sottospinato (o infraspinato) ha forma triangolare, originato dalla fossa sottospinata, si inserisce alla grande tuberosità dell'omero. È innervato dal nervo sovrascapolare.

Il muscolo piccolo rotondo ha origine dal margine laterale della scapola e portandosi in alto e lateralmente si inserisce alla grande tuberosità dell'omero. È posto tra il muscolo grande rotondo in basso e il muscolo sottospinato in alto. È innervato dal nervo ascellare.

Il muscolo grande rotondo origina in prossimità del margine laterale presso l'angolo inferiore della scapola; si dirige in alto e lateralmente portandosi anteriormente, si inserisce al labbro mediale del solco bicipitale dell'omero. Il muscolo grande rotondo procede dapprima appaiato con il muscolo piccolo rotondo; successivamente i due muscoli divergono e si costituiscono, così, il "triangolo dei muscoli rotondi", diviso in due parti dal capo lungo del tricipite: lo spazio omerotricipitale, dove passano l'arteria circonflessa posteriore dell'omero e il nervo ascellare, e lo spazio omotricipitale, dove passa l'arteria circonflessa della scapola. È innervato dal nervo sottoscapolare inferiore.

Il muscolo sottoscapolare origina dalla faccia anteriore della scapola e, dirigendosi lateralmente e in alto, si inserisce alla piccola tuberosità dell'omero. È innervato dai nervi sottoscapolari superiore e inferiore.

I muscoli sovraspinato, infraspinato, piccolo rotondo e sottoscapolare con le loro inserzioni in prossimità della capsula dell'articolazione scapolomeroale contribuiscono alla stabilizzazione dell'articolazione e costituiscono la cosiddetta "cuffia dei rotatori", che permette i movimenti di abduzione e rotazione [3].



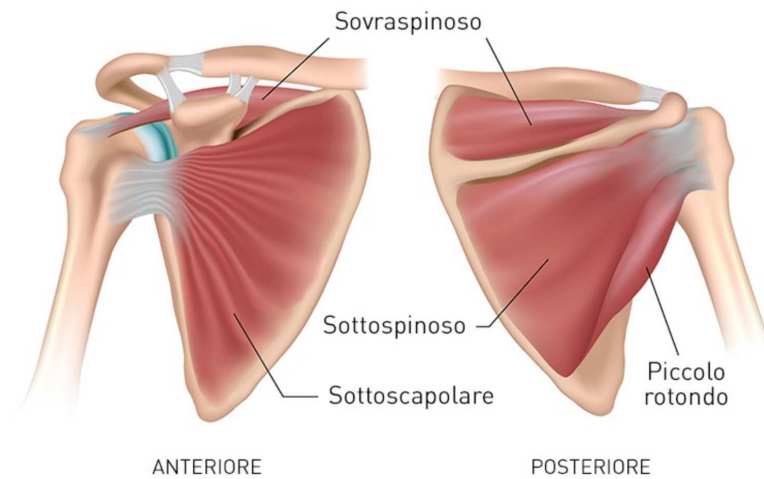


Figure 6: cuffia dei rotatori della spalla

Le arterie profonde sono le due arterie trasversa della scapola e trasversa del collo (rami dell'arteria succlavia) e l'arteria circonflessa della scapola (ramo dell'arteria ascellare).

Le vene profonde sono le vene trasverse della scapola e del collo, che sboccano nella vena succlavia, e le vene circonflesse della scapola, tributarie della vena ascellare. I vasi linfatici sono tributari principalmente di linfonodi ascellari. I nervi sono il nervo sovrascapolare e il nervo ascellare, rami del plesso brachiale.[3]

La regione deltoidea prende il nome dal muscolo deltoide che ne caratterizza la forma, è delimitata in alto dal terzo laterale della clavicola, dall'acromion e dalla spina della scapola; in avanti e indietro dai margini anteriore e posteriore del muscolo deltoide. In basso detti margini convergono ad angolo acuto verso la tuberosità deltoidea dell'omero. La forma è grossolanamente triangolare, con la base in alto e medialmente e l'apice in basso e lateralmente, corrispondente all'inserzione del muscolo deltoide. La cute è spessa, povera di peli, mentre il tessuto sottocutaneo mostra un pannicolo adiposo di diversa consistenza a seconda dello stato di nutrizione e del sesso. Le arterie superficiali sono sottili e provengono dalle arterie acromiotoracica e circonflessa posteriore dell'omero. Le vene superficiali formano un plesso tributario della vena cefalica. I vasi linfatici superficiali sono tributari dei linfonodi ascellari. I nervi superficiali sono rami del plesso cervicale e del nervo ascellare, a sua volta del plesso cervicale. La fascia deltoidea riveste la faccia esterna del muscolo deltoide, prendendo salda connessione con le sporgenze ossee circostanti. Trapassa poi nella fascia delle regioni vicine.

Il muscolo deltoide prende origine dalla clavicola, dall'acromion e dalla spina della scapola e si inserisce sulla tuberosità deltoidea del terzo superiore dell'omero. È innervato dal nervo ascellare [3].

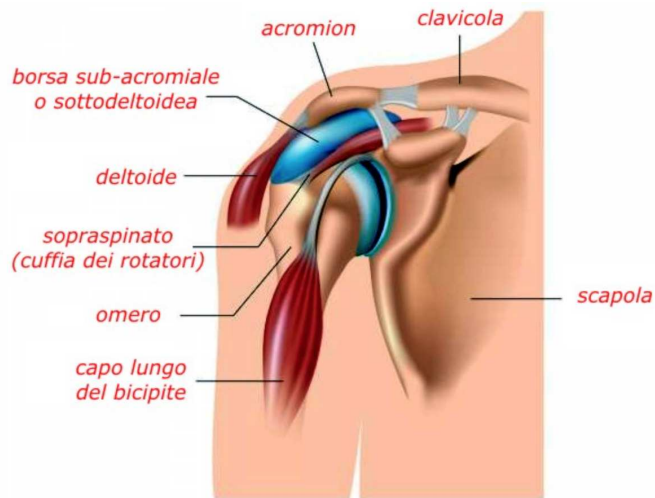


Figure 7: regione deltoidea della spalla

Al di sotto del muscolo deltoide si ritrovano le strutture ossee del cingolo scapolare: acromion, parte della clavicola, articolazione acromioclavicolare, processo coracoideo con origini muscolari, articolazione scapolomeroale con la sua capsula, le tuberosità dell'omero. La parte anteriore dell'acromion il processo coracoideo sono uniti dal legamento coracoacromiale, che forma un'arcata sopra l'articolazione scapolomeroale. Un numero variabile di borse sierose separa fasci muscolari, tendini e sporgenze ossee. Le arterie profonde sono rami dell'arteria ascellare. Esse contribuiscono a formare, fra l'altro, una ricca rete anastomotica, come avviene di regola intorno alle grandi articolazioni. Le vene profonde sono tributarie della vena ascellare e seguono il decorso delle arterie. I nervi sono rappresentati dal nervo ascellare e dai suoi rami [3].

Grazie all'anatomia delle sue superfici articolari, l'articolazione della spalla è dotata di estrema mobilità. In particolare, sono consentiti alla spalla il moto di ante-retroposizione, ovvero la rotazione attorno a un asse parallelo al piano frontale; e il movimento di elevazione-abbassamento della spalla, considerando invece la rotazione attorno ad un asse perpendicolare allo stesso piano frontale. Questi movimenti derivano da diverse articolazioni anatomiche e fisiologiche della spalla:

- scapolo-omeroale (articolazione anatomica)
- sotto-deltiloidea (articolazione fisiologica)
- scapolo-toracica (articolazione fisiologica)
- acromion-clavicolare (articolazione anatomica)
- sterno-costo-clavicolare (articolazione anatomica).

L'articolazione scapolo-omerale, a differenza delle altre presenti nella spalla, presenta una capsula articolare. Questa articolazione è una giunzione sferica, che consente 3 gradi di libertà rotatori cui si aggiungono l'elevazione, l'anteposizione e la retroposizione della spalla rispetto al torace, concessi dalle articolazioni scapolotoraciche [3][16].

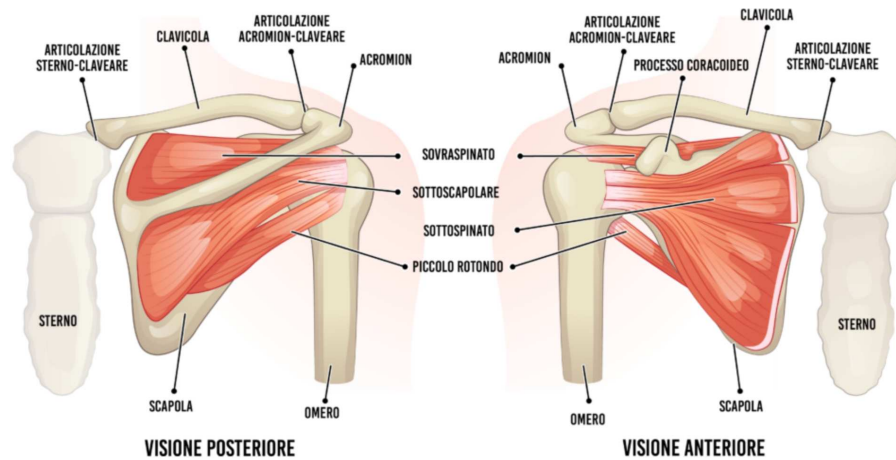


Figure 8: articolazioni della spalla

## 1.2 Disturbi muscolo-scheletrici

I disturbi muscolo-scheletrici costituiscono una vasta gamma di problemi che coinvolgono muscoli, tendini, legamenti, ossa, cartilagini, articolazioni, nervi e vasi sanguigni [15].

Secondo l'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) le patologie muscoloscheletriche sono le principali e più comuni problematiche che causano una riduzione del benessere personale, con ripercussioni nelle attività di vita quotidiana. Inoltre, la loro incidenza è aumentata nel corso degli anni. Infatti, dati del secolo scorso mostrano come ci sia un drastico aumento nel numero di lavoratori aventi un disturbo muscolo-scheletrico, come indicano i dati del Bureau of Labor Statistics del US Department of Labor (BLS), dove la percentuale è passata dal 18% nel 1982 al 65% nel 1998. Dati più recenti della UE Labour Force Survey (LFS), facenti riferimento a 27 paesi dell'Unione Europea mostrano che la percentuale è aumentata dal 54,2% (2007) al 60,1% (2020) in soggetti di età compresa tra i 15 e i 64 anni. Altri dati epidemiologici indicano come la prevalenza dei disturbi muscolo-scheletrici relativi agli arti superiori (collo, spalle, braccio, gomito, avambraccio, mano, dita) sia aumentata dal 30% nel 1966 al 47% nel 2004 [11]. Quindi, è comune che gli individui sperimentino mal di schiena, dolori al collo e alle braccia, problemi spesso sono attribuiti all'invecchiamento, ma che possono anche derivare da posture scorrette e da movimenti ripetitivi o sbagliati, sia durante le attività lavorative sia in quelle quotidiane [29]. Queste condizioni sono

caratterizzate da sintomi dolorosi e limitazioni nella mobilità, talvolta accompagnate da manifestazioni che coinvolgono anche altre parti del corpo [27][17][18].

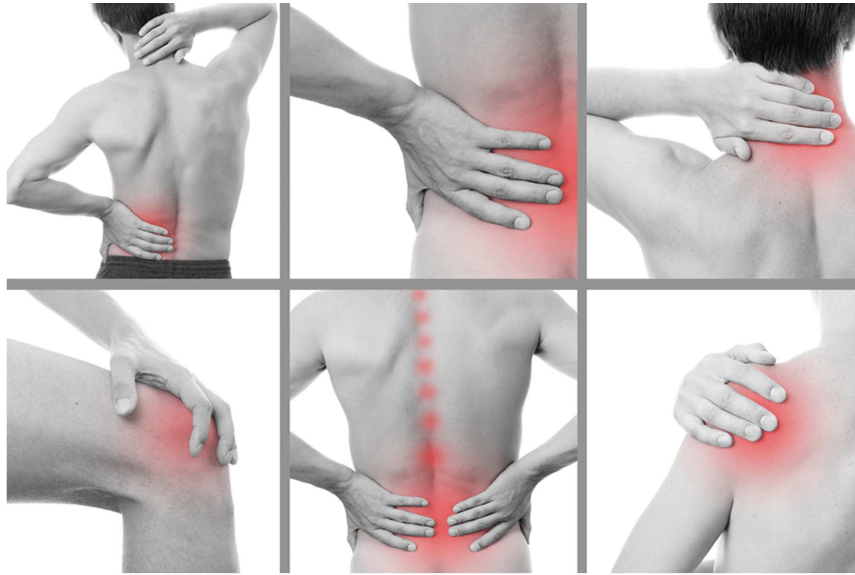


Figure 9: disturbi muscolo-scheletrici

Esistono diversi fattori di rischio che possono portare all'insorgenza di disturbi muscolo-scheletrici. Tali fattori si dividono in occupazionali, cioè relativi all'ambiente di lavoro e alle mansioni, e non occupazionali.

Tra i fattori di rischio occupazionali abbiamo:

- uso eccessivo di forza
- movimenti ripetitivi
- posture statiche prolungate sia da seduti sia da posizione ortostatica
- posture incongrue durante il movimento dinamico
- basse temperature
- vibrazioni
- una combinazione dei fattori di rischio precedenti
- tipologia di lavoro
- ore di lavoro.

I fattori di rischio non occupazionali possono essere:

- numero ridotto di ore di riposo

- età
- sesso femminile
- etnia
- fattori socio-culturali
- patologie pre-esistenti
- BMI (body mass index)
- diabete
- tiroiditi
- storia clinica di disordini e carico della muscolatura

. In aggiunta, si possono avere disturbi muscolo-scheletrici specifici o non specifici. I primi evidenziano un segno clinico del disturbo, mentre i secondi presentano dolore senza segni clinici [11].

Le patologie che più frequentemente interessano la spalla sono:

- Periartrite alla spalla, caratterizzata dall'infiammazione cronica e dall'irrigidimento della capsula articolare [24]
- Lussazione della spalla, la quale prevede la fuoriuscita permanente della testa dell'omero dalla cavità glenoidea della scapola
- Spalla congelata, caratterizzata da un'iniziale infiammazione della capsula articolare che progredisce in una fibrosi capsulare
- Infiammazione della cuffia dei rotatori, causata da ripetuti ed eccessivi movimenti della spalla, in associazione ad alcuni fattori specifici che potrebbero contribuire alla sua origine (età, sesso, . . .)
- Lesioni della cuffia dei rotatori, che consistono nella lacerazione parziale o totale di uno o più tendini che uniscono i muscoli sottoscapolare, sovraspinato, piccolo rotondo e sottospinato alle strutture ossee
- Conflitto subacromiale, il quale è dovuto ad un sovraccarico ripetuto o all'utilizzo eccessivo dell'articolazione della spalla, che provocano la degenerazione o l'infiammazione dei tendini della cuffia dei rotatori
- Lussazione acromion claveare, che comporta dolore alla spalla e una limitazione dei movimenti attivi e passivi, con possibile gonfiore, ematoma e deformità dell'articolazione.

Per ridurre l'incidenza di tali patologie risulta, quindi, importante l'introduzione di dispositivi ergonomici, quali gli esoscheletri, che aiutino a prevenire l'insorgenza di tali problematiche [15][10].

### 1.3 Stato dell'arte

La parola esoscheletro deriva dalla composizione di due termini di origine greca, “exo” che significa fuori e “skeletos” che vuol dire duro; con questo termine, in ambito zoologico, viene definita una struttura esterna, più o meno rigida, che protegge il corpo e, in alcuni casi, dà sostegno agli organi interni.

L'utilizzo del termine esoscheletro in ambito tecnologico ha avuto inizio con la comparsa di apparecchi meccanici indossabili pensati per aumentare la potenza muscolare dell'uomo, costituendo una sorta di “muscolatura artificiale” [20].

Gli esoscheletri sono dispositivi robotici indossabili concepiti per supportare e migliorare la funzionalità delle parti del corpo affette da disturbi o disabilità [22]. Essi offrono soluzioni versatili per migliorare la qualità della vita dei pazienti, sia attraverso il potenziamento delle capacità fisiche che l'assistenza nel percorso di riabilitazione [16]. Questi strumenti simulano i movimenti umani e seguono una struttura antropomorfa, potenziando o sostituendo le capacità degli arti coinvolti. Gli esoscheletri agiscono sinergicamente con l'utente, sommando la forza impressa dal corpo a quella necessaria per eseguire i movimenti desiderati. Quindi, essi offrono l'opportunità di amplificare la forza, migliorare la precisione e potenziare le capacità umane [9].

Gli esoscheletri possono essere classificati in base al sistema di attuazione o al distretto corporeo. Per quanto riguarda i distretti corporei, si identificano quattro macro-aree:

- corpo completo
- arti superiori
- arti inferiori
- tronco

Invece, per quanto concerne il sistema di attuazione, gli esoscheletri si classificano in:

- attivi
- quasi-passivi
- passivi

[15][20]

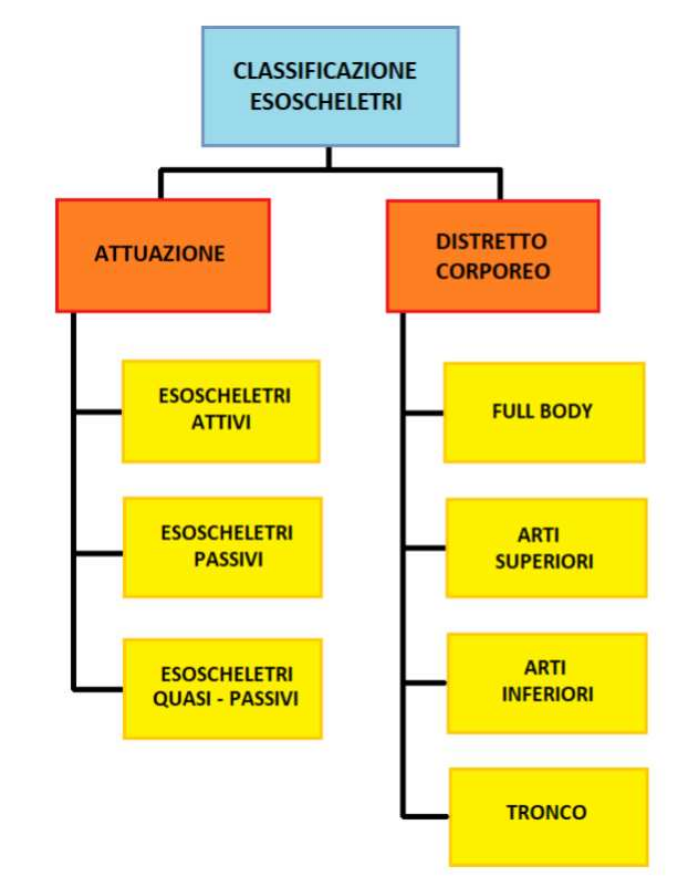


Figure 10: classificazione degli esoscheletri

L'esoscheletro attivo è un dispositivo indossabile che genera forza attraverso degli attuatori, ovvero sistemi di azionamento attivi come motori elettrici, sistemi idraulici o sistemi pneumatici [12]. Quelli maggiormente utilizzati sono i motori elettrici, caratterizzati da alta efficienza e possibilità di regolazione attraverso riduttori di velocità a seconda della coppia necessaria sul giunto. La forza generata dall'esoscheletro attivo viene controllata tramite sensori che raccolgono informazioni dai movimenti svolti e determinano le necessità dell'operatore. Infatti, attraverso i sensori, opportunamente posizionati sulla struttura, si raccolgono dati sull'intenzione di movimento del soggetto. Successivamente, i dati vengono elaborati da un regolatore e vengono mandati agli attuatori, i quali compiono l'opportuno movimento dell'esoscheletro e della persona. Esso funziona meccanicamente in parallelo con il corpo umano unendo la potenza della macchina all'intelligenza umana. Adattandosi alla forma e alle funzioni dell'essere umano è in grado di aumentare la forza dell'operatore riducendo lo sforzo, il sovraccarico biomeccanico e l'affaticamento. Questi dispositivi di sup-

porto attivi necessitano di una fonte di energia esterna come pile o batterie ricaricabili per alimentare sensori e attuatori. Il controllo dei movimenti può avvenire per mezzo delle tensioni muscolari registrate dai sensori e/o tramite un controllo remoto che può essere preimpostato e adattato a seconda delle esigenze. Essi sono costruiti con materiali rigidi come metalli e fibra di carbonio [15][20][11].

L'esoscheletro quasi-passivo utilizza soluzioni come valvole proporzionali o frizioni attuate che hanno caratteristiche passive, ma necessitano di energia per il loro controllo [15][20][11].

L'esoscheletro passivo, invece, non utilizza degli attuatori, batterie o componenti elettronici, ma solitamente delle molle o degli smorzatori in grado di accumulare energia durante il movimento umano per poi utilizzarla per raggiungere o mantenere una determinata postura. È evidente come questi dispositivi non consumino energia elettrica o chimica e non forniscano alcun lavoro meccanico positivo netto, ma il loro scopo è semplicemente quello di ridurre il costo metabolico di svolgimento di determinate attività. Gli esoscheletri passivi hanno, quindi, il vantaggio di non richiedere fonti di energia, risultando in questo modo più leggeri di quelli attivi, non ponendo alcun problema di autonomia e presentando meno rischi per la sicurezza del soggetto. Inoltre, essi risultano essere generalmente meno costosi e più comodi rispetto a quelli attivi, ma non sono molto versatili ed assistono i lavoratori solo in uno specifico movimento [15][20][11][22].



## 2 Materiali e metodi

Lo studio condotto è volto alla valutazione dell'efficienza di un esoscheletro per le spalle, il Paexo Shoulder.

Per effettuare tale ricerca è stato individuato un gruppo eterogeneo di soggetti, ai quali è stato chiesto di svolgere delle attività e dei test. In particolare, ciascun partecipante è stato sottoposto ad una fase di familiarizzazione ed ad una fase di sperimentazione.

Per svolgere l'analisi sono stati utilizzati diversi sensori, tra i quali i sensori EMG, sui quali ci concentreremo in questa indagine.

Dopo aver svolto i test, è stato chiesto ai soggetti di compilare un questionario, contenente domande atte a valutare soggettivamente il grado di fatica e l'utilità dell'esoscheletro.

In questo modo, si sono raccolti dati che hanno permesso di esaminare i vantaggi e gli svantaggi nell'utilizzo del Paexo Shoulder.

### 2.1 Paexo Shoulder

Il Paexo Shoulder, progettato dall'azienda tedesca Ottobock, è un esoscheletro passivo per il supporto della spalla. Il Paexo Shoulder è stato progettato appositamente per l'uso nella logistica, nella produzione e nella manutenzione per i compiti sopraelevati, al fine di alleviare la fatica sulle spalle nell'industria [23]. Questo esoscheletro industriale può essere utilizzato sia all'interno che all'esterno e si concentra sul sostegno della parte superiore del corpo, in particolare delle spalle, del collo e delle braccia, durante le attività che necessitano di mantenere le braccia sollevate [15].



Figure 11: Paexo Shoulder



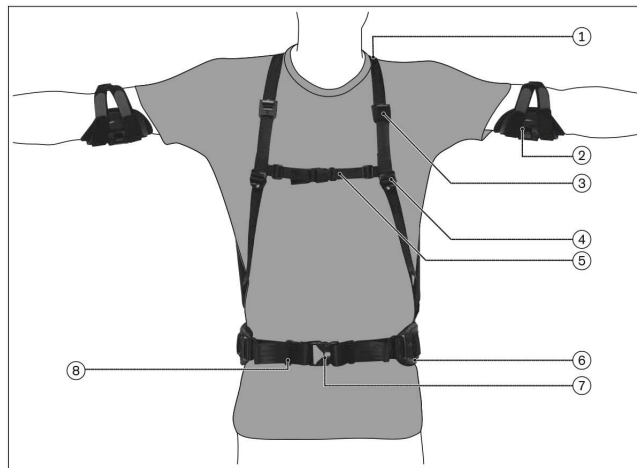
Table 1: Componenti del Paexo Shoulder

Esso non utilizza motori o fonti di energia esterne, ma sfrutta dei principi meccanici che redistribuiscono il peso delle braccia e riducono lo stress sulla muscolatura delle spalle. Il Paexo Shoulder permette di alleviare il carico sui muscoli delle spalle e del collo durante attività che richiedono il sollevamento delle braccia per lunghi periodi di tempo, trasferendo parte del peso verso le anche attraverso un sistema di leve e supporti.

L'esoscheletro pesa 1,9 kg ed è adatto a utenti di altezza compresa tra 160 e 190 cm. Infatti, grazie ad una serie di regolazioni, il dispositivo può adattarsi alla corporatura del singolo utente. Esso è idrorepellente e antipolvere, e può essere utilizzato a temperature fino a 50 gradi. Inoltre, tale supporto offre sostegno nel sollevare fino a 6 kg per braccio [23].

Il Paexo Shoulder è particolarmente indicato per i lavoratori in settori come l'automotive, l'aeronautica e l'edilizia, dove si svolgono mansioni sopraelevate e ripetitive, come l'installazione di componenti, la pittura o la saldatura.

Con tale prodotto, l'azienda Ottobock è intenzionata a migliorare la qualità del lavoro e la salute dei lavoratori, prevenendo problematiche legate a movimenti ripetitivi ed a posture incorrette per il corpo [1].



Vista anteriore			
Pos.:	Denominazione	Pos.:	Denominazione
1	Bretella per la spalla	5	Cintura toracica
2	Supporto per il braccio con imbottitura	6	Imbottitura cintura pelvica
3	Posizione di riposo chiusura magnetica	7	Chiusura a scatto
4	Fermo della bretella per la spalla	8	Fermacintura per cintura pelvica



Vista posteriore			
Pos.:	Denominazione	Pos.:	Denominazione
9	Rotella di regolazione per capacità di supporto	19	Fermaglio di fissaggio
10	Unità articolazione	20	Passante di aggancio
11	Asta per braccio	21	Rinforzo cintura pelvica
12	Chiusura magnetica	22	Chiusura a velcro imbottitura cintura pelvica
13	Arresto rotante	23	Cintura per la schiena
14	Estensore	24	Fermo della cintura per la schiena
15	Copertura dell'estensore	25	Fermo del tirante
16	Dado di regolazione	26	Piastra d'incrocio sulla schiena
17	Asta filettata	27	Tirante
18	Unità di regolazione con alloggiamento a sfera		

Figure 12: Caratteristiche del Paexo Shoulder

## 2.2 Soggetti

In questo studio sono stati coinvolti 13 soggetti, 5 donne e 8 uomini, con altezza compresa tra 161 e 185 cm, peso tra 52 e 85 kg ed età tra 21 e 37 anni.

soggetto	sexso	età	mano dominante	altezza (m)	peso (kg)	BMI (kg/m <sup>2</sup> )
s1	M	25	destra	1.80	75	23.15
s2	M	23	destra	1.75	85	27.75
s3	M	23	destra	1.85	73	21.33
s4	M	21	destra	1.72	73	24.67
s5	M	22	destra	1.76	74	23.89
s6	M	21	destra	1.74	72	23.78
s7	M	24	destra	1.70	70	24.22
s8	M	21	destra	1.72	73	24.67
s9	F	37	destra	1.61	52	20.06
s10	F	31	destra	1.73	60	20.05
s11	F	29	destra	1.63	52	19.57
s12	F	25	destra	1.68	55	19.49
s13	F	22	destra	1.63	56	21.08
media	8/13 M, 5/13 F	24.92	13/13 destra	1.72	66.92	22.59

Table 2: Informazioni sui soggetti

## 2.3 Elettromiografia

L'elettromiografia (EMG) è una misura dell'attività elettrica del muscolo, utilizzata per monitorarne l'attivazione e avere una stima qualitativa della forza generata dal muscolo stesso. Il segnale elettromiografico viene captato grazie a degli elettrodi, inseriti nei muscoli o piazzati sulla cute, in grado di rilevare i potenziali d'azione prodotti dalle fibre muscolari quando il muscolo si contrae [19].

In questo studio, gli elettrodi sono stati applicati in specifiche posizioni sulla cute, in modo da valutare i seguenti muscoli:

- right erector spinae longissimus
- left erector spinae longissimus
- right deltoideus medius
- left deltoideus medius
- right trapezius descendens
- left trapezius descendens
- right deltoideus anterior
- left deltoideus anterior

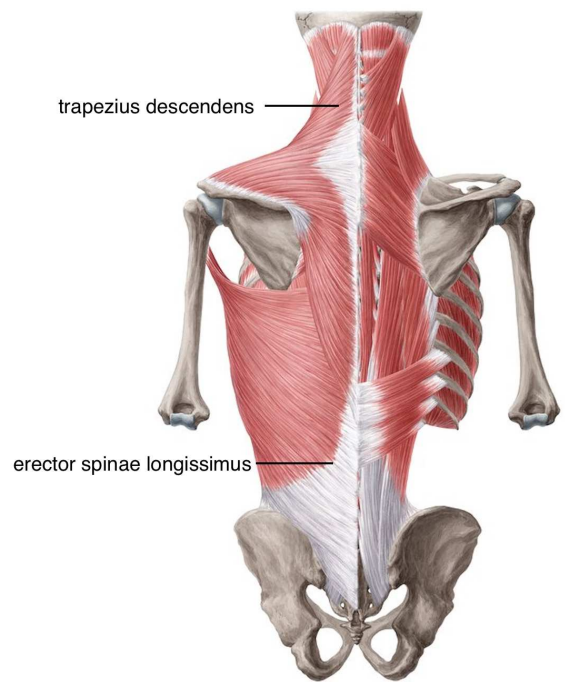


Figure 13: Erector spinae longissimus e trapezius descendens

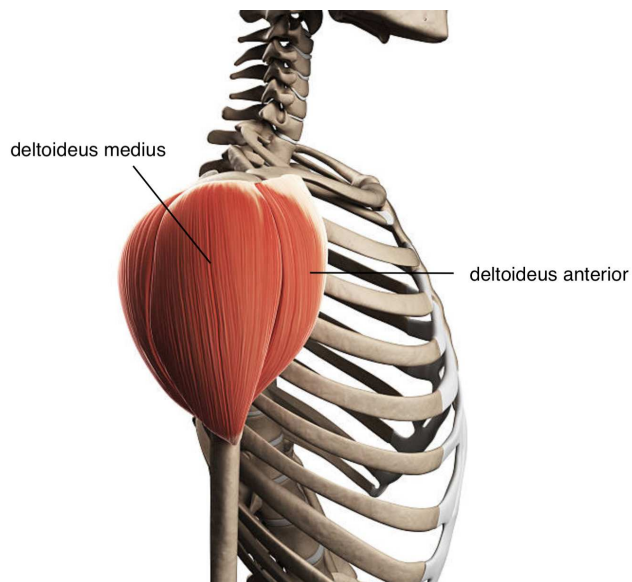


Figure 14: Deltoideus medius e deltoideus anterior

Lo strumento che, in questa indagine, ha permesso l'analisi dell'attività muscolare è l'elettromiografo wireless FREEEMG 1000, prodotto dalla BTS Bio-engineering e costituito da 8 sonde.



Figure 15: Elettromiografo wireless FREEEMG 1000

Le sonde FREEEMG consentono di effettuare, in modo assolutamente non invasivo, una valutazione funzionale dinamica dello stato di attivazione delle catene muscolari, fornendo indicazioni riguardo il momento, la durata e l'entità dell'attivazione muscolare durante l'esecuzione di un movimento [5]. A ciascuna sonda sono stati applicati due elettrodi adesivi, i quali hanno permesso di rilevare lo sforzo muscolare in maniera non invasiva. L'accoppiamento tra pelle ed elettrodo è realizzato tramite un gel conduttivo, che permette di ridurre la resistenza elettrica, migliorare l'aderenza e minimizzare le interferenze [19]. Successivamente, per eseguire l'esame clinico sul paziente, è stato utilizzato il software EMG-Analyzer ed è stato applicato uno dei protocolli valutativi.

## 2.4 Protocollo

Il protocollo per la valutazione dell'efficienza del Paexo Shoulder consta di 2 fasi: una fase di familiarizzazione e una fase di sperimentazione, la quale si articola in test statico e test dinamico.

Durante la fase di familiarizzazione è stato usato il G-Sensor, mentre per la fase di sperimentazione sono stati impiegati i sensori EMG, lo smartwatch Empatica e il sistema Xsens.

Il G-Sensor è un sensore inerziale che consente di effettuare una valutazione cinematica del movimento. Questo dispositivo fornisce i valori di accelerazione e velocità caratteristici dello specifico task motorio eseguito ed i riferimenti temporali che consentono di suddividere il movimento in differenti sottofasi, all'interno delle quali viene analizzato il comportamento muscolare [5].



Figure 16: G-Sensor

Nella fase di sperimentazione, i sensori EMG vengono attivati e applicati ai muscoli individuati dal protocollo. A questo punto, si verifica tramite il software EMG-Analyzer che tutte le sonde siano attive e rilevino correttamente l'attività muscolare.

In seguito, viene indossato lo smartwatch Empatica, che monitora i parametri vitali del soggetto, tra cui l'attività elettrodermica (EDA), la frequenza cardiaca (tramite un sensore ottico basato sulla fotopleletismografia, PPG) e la temperatura cutanea [8].

Infine, viene utilizzato Xsens, un sistema di motion capture che, mediante la sua aderente tuta in lycra con 17 sensori, consente di catturare movimenti complessi e altamente dinamici, creare dati e trasmetterli ad un ricevitore per l'analisi [28].



Figure 17: Empatica



Figure 18: Xsens

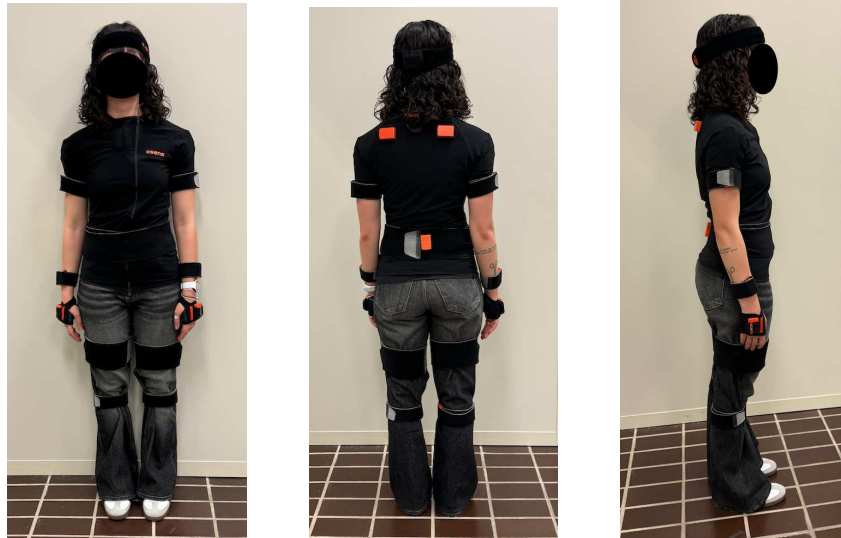


Figure 19: vestizione senza esoscheletro



Figure 20: vestizione con esoscheletro

Dopo aver vestito il soggetto con sonde EMG, smartwatch Emptatica ed Xsens, quest'ultimo viene calibrato e viene avviato in contemporanea con l'EMG-Analyzer. La calibrazione di Xsens dovrà essere ripetuta ogni volta che si indossa



o si rimuove l'esoscheletro prima di svolgere il test. Importante è verificare che la calibrazione di Xsens sia avvenuta in modo corretto e tutte le sonde EMG siano accese e rilevino correttamente il segnale. Inoltre, prima di iniziare il task, si registra anche un riferimento temporale tramite Empatica, in modo tale da gestire correttamente la sincronizzazione dei dati.

Quindi, il protocollo prevede che il soggetto familiarizzi con l'esoscheletro, per poi, in un secondo momento, svolgere un test statico ed un test dinamico, sia con il Paexo Shoulder indossato sia senza di esso. In particolare, l'ordine di svolgimento dei test viene determinato in modo randomico, cosicché i risultati vengano influenzati il meno possibile dalla stanchezza e dall'affaticamento dell'individuo, dovuti alle attività precedentemente svolte.

#### **2.4.1 Familiarizzazione**

Nella fase di familiarizzazione viene chiesto ai soggetti di indossare l'esoscheletro, provarlo e utilizzarlo, in modo tale da comprenderne quanto possibile il funzionamento e le potenzialità.

Per familiarizzare con l'esoscheletro i soggetti hanno svolto diverse attività di vita quotidiana: camminare, raccogliere oggetti da terra, spostare oggetti da un punto all'altro, bere, rispondere al cellulare, sedersi davanti al pc e utilizzarlo. Concluse queste attività, sono stati compilati dei questionari di valutazione.

#### **2.4.2 Test statico**

Per il test statico viene richiesto al soggetto di rimanere in posizione eretta, tenendo un avvitatore da circa 2 kg in mano di fronte a sé, formando con il braccio un angolo di 90 gradi, fino ad affaticamento. Appena il partecipante percepisce l'affaticamento può fermarsi e si tiene conto del tempo impiegato, altrimenti il task dura 3 minuti.

Inoltre, ogni 30 secondi, si pone una domanda sull'affaticamento percepito, per valutare l'endurance. In particolare, il soggetto dovrà valutare il suo affaticamento su una scala da 1 a 10.

Infine, vengono compilati questionari user experience e affaticamento relativi al task svolto.

#### **2.4.3 Test dinamico**

Il test dinamico consiste in un task di avvitatura con avvitatore da circa 2 kg. In particolare, il partecipante dovrà avvitare 20 viti sul profilo, con posizionamento delle viti overhead e frontale. Alcune di queste sono già predisposte, altre devono essere prese e avvitate in entrambe le configurazioni. Inoltre, si tiene conto del tempo impiegato ad avvitare le viti e si considera se esse siano state avvitate correttamente, cioè il numero di ripetizioni.

Quindi, attraverso il test dinamico è possibile valutare le seguenti metriche: precisione e numero di ripetizioni.

Infine, anche per il test dinamico, vengono compilati questionari user experience, usabilità e affaticamento relativi al task svolto.



Figure 21: test statico senza es-oscheletro



Figure 22: test statico con es-oscheletro



Figure 23: test dinamico con es-oscheletro con posizionamento frontale



Figure 24: test dinamico con es-oscheletro con posizionamento over-head

## 2.5 Questionari

Per valutare soggettivamente lo sforzo durante le attività è stato chiesto ai soggetti di compilare dei questionari:

- un questionario intermedio per il test statico
- un questionario intermedio per il test dinamico
- un questionario finale

In particolare, per i questionari intermedi, lo sforzo complessivo e la fatica localizzata su spalle, braccia e schiena, sono state valutate da 0 a 11 tramite la scala di Borg CR10, dove 0 indica che lo sforzo e la fatica sono nulli, mentre 11 significa che lo sforzo è massimo, il più alto possibile. Invece, la valutazione dell'attività nel complesso è data da una scala da 1 a 7, dove 1 sta per “molto difficile”, mentre 7 significa “molto semplice”.

Da ciò si possono ricavare informazioni che consentono di valutare l'efficacia nell'utilizzo dell'esoscheletro.

0: Assolutamente niente  
0.3  
0.5: Estremamente debole, appena percettibile  
1: Molto debole  
1.5  
2: Debole, leggero  
2.5  
3: Moderato  
4  
5: Forte, pesante  
6  
7: Molto forte  
8  
9  
10: Estremamente forte  
11: Massimo assoluto, il più alto possibile

Figure 25: scala di Borg CR10

Per quanto riguarda il questionario finale, i soggetti hanno valutato l'esoscheletro assegnando un punteggio da 1 a 7 a determinati aggettivi e affermazioni.

## 2.6 Analisi dei dati

Per analizzare i dati oggettivi ottenuti dai test ho utilizzato la piattaforma di programmazione e calcolo numerico MATLAB.

MATLAB (abbreviazione di Matrix Laboratory) è un ambiente per il calcolo numerico e l'analisi statistica scritto in C, che comprende anche l'omonimo linguaggio di programmazione creato dalla MathWorks. Esso consente di manipolare matrici, visualizzare funzioni e dati, implementare algoritmi, creare interfacce utente, e interfacciarsi con altri programmi [21].

Per analizzare i dati ho, innanzitutto, caricato i file ricavati dall'EMG-Analyzer in MATLAB R2023b e li ho filtrati con un filtro passa-banda di Butterworth del quarto ordine, in modo tale da eliminare sia il rumore a bassa frequenza sia quello ad alta frequenza. In particolare, ho scelto come frequenze di taglio 30 Hz e 450 Hz.

Successivamente, ho calcolato, per entrambi i test e separando gli uomini dalle donne, il valore massimo di contrazione, l'RMS, la media degli RMS e la deviazione standard degli RMS per ciascun muscolo in analisi. RMS sta per "Root Mean Square" ed è un parametro spesso utilizzato per caratterizzare nel dominio del tempo un segnale di tipo aleatorio, cioè un segnale che non può essere descritto da una relazione matematica sulla base della conoscenza dei campioni in istanti precedenti, ma va analizzato con metodi statistici, assumendo che un qualunque campione sia espressione di una variabile casuale con una certa distribuzione di probabilità [4].

Per calcolare l'RMS, la sua media e la deviazione standard ho dovuto, però, precedentemente normalizzare e rettificare il segnale, ovvero ho reso il segnale unipolare e positivo (tutto il segnale sopra l'asse orizzontale).

In aggiunta, ho effettuato una valutazione statistica attraverso il test t-Student, in particolare un t-test appaiato. Il test t-Student per due gruppi appaiati confronta la differenza media tra due gruppi con un valore specifico [6][15].

In questo caso, le ipotesi sono:

- ipotesi nulla ( $H_0$ ): non c'è differenza significativa tra le medie delle misurazioni nelle due condizioni, cioè  $media_{exo} = media_{noexo}$
- ipotesi alternativa ( $H_1$ ): c'è una differenza significativa tra le medie delle misurazioni nelle due condizioni, cioè  $media_{exo} \neq media_{noexo}$

La probabilità di ottenere i dati osservati assumendo che sia vera l'ipotesi nulla è detta p-value. Prima di effettuare il test va definito un valore del p-value in base al quale rifiutare o meno l'ipotesi nulla. Tale valore è detto livello di significatività e, in questo caso, ho scelto come valore 0.05.

- Se il p-value  $> 0.05$ , l'ipotesi nulla non viene rigettata, ma non viene accettata.

- Se il p-value  $\leq 0.05$ , l'ipotesi nulla viene rigettata e viene accettata l'ipotesi alternativa.

Infine, ho plottato separatamente i segnali EMG e RMS provenienti dai singoli muscoli in analisi, sovrapponendo il tracciato ottenuto con indosso l'esoscheletro a quello ottenuto senza esoscheletro, in modo da evidenziarne la differente ampiezza.

### 3 Risultati

In questa sezione verranno presentati i risultati ottenuti dall'analisi dei dati raccolti durante la sperimentazione sull'uso dell'esoscheletro Paexo Shoulder. I risultati si basano su dati soggettivi e dati oggettivi. I dati soggettivi provengono dai questionari compilati dai partecipanti, attraverso i quali sono state raccolte le percezioni relative alla fatica, allo sforzo e alla facilità di utilizzo dell'esoscheletro durante i test statici e dinamici, sia con che senza il dispositivo. Inoltre, è stato somministrato un questionario finale per valutare l'esperienza complessiva.

I dati oggettivi, invece, riguardano misurazioni delle performance fisiche durante le attività svolte, tramite sonde EMG. Questi dati permettono di analizzare l'efficacia dell'esoscheletro nel ridurre la fatica e migliorare l'efficienza lavorativa.

I risultati verranno presentati confrontando le risposte dei partecipanti e distinguendo tra soggetti di sesso maschile e femminile. In particolare, saranno evidenziate le variazioni, in percentuale, della massima contrazione muscolare e degli RMS. La variazione percentuale è stata calcolata utilizzando la seguente formula:

$$\Delta\% = \frac{\text{Valore con esoscheletro} - \text{Valore senza esoscheletro}}{\text{Valore senza esoscheletro}} \times 100$$

dove  $\Delta\%$  rappresenta la variazione percentuale per ciascun parametro valutato, confrontando i valori riportati dai partecipanti con e senza l'utilizzo dell'esoscheletro. L'analisi oggettiva permetterà di mettere in risalto quelle che sono le differenze nelle performance dei partecipanti quando si indossa e non si indossa l'esoscheletro, in termini di contrazione muscolare e, attraverso il test t-Student, verrà definito se tali differenze siano o meno significative in termini statistici.

#### 3.1 Risultati dell'analisi soggettiva

I dati soggettivi provengono, in gran parte, dai questionari fatti compilare ai partecipanti una volta indossato l'esoscheletro e svolto il test. In particolare, sono stati compilati 5 questionari:

- un questionario intermedio dopo aver svolto il test statico con l'esoscheletro
- un questionario intermedio dopo aver completato il test statico senza l'esoscheletro
- un questionario intermedio una volta portato a termine il test dinamico con l'esoscheletro
- un questionario intermedio dopo aver concluso il test dinamico senza l'esoscheletro
- un questionario finale che raccoglie informazioni sull'esperienza complessiva.

Il questionario intermedio per il test statico è stato compilato appena completato il task statico ed ha fornito i seguenti risultati:

soggetto	sforzo	fatica spalle	fatica braccia	fatica schiena	attività
s1	-20%	-30%	-30%	-5%	+14.3%
s2	-20%	-45%	-20%	-10%	+28.6%
s3	-30%	-20%	-40%	-20%	+42.9%
s4	-10%	0	+10%	-30%	+28.6%
s5	-10%	-40%	-30%	-40%	+14.3%
s6	-20%	-20%	-30%	-20%	+14.3%
s7	-20%	-20%	-20%	-15%	+28.6%
s8	-30%	-30%	-5%	-40%	+14.3%
<b>media</b>	-20%	-26.62%	-20.62%	-25%	+23.24%

Table 3: Risultati del questionario intermedio per il test statico degli uomini: percentuali che esprimono le differenze nelle valutazioni dei partecipanti dopo aver svolto il test con e senza esoscheletro

soggetto	sforzo	fatica spalle	fatica braccia	fatica schiena	attività
s9	-10%	-5%	-10%	0	+14.3%
s10	+10%	0	+10%	+20%	0
s11	-20%	-30%	-20%	-30%	+14.3%
s12	+30%	+10%	-10%	+20%	+28.6%
s13	-30%	-30%	-25%	-10%	+14.3%
<b>media</b>	-4%	-11%	-11%	+0%	+14.3%

Table 4: Risultati del questionario intermedio per il test statico delle donne: percentuali che esprimono le differenze nelle valutazioni dei partecipanti dopo aver svolto il test con e senza esoscheletro

In questo caso, lo sforzo complessivo risulta essere mediamente diminuito del 20% negli uomini e del 4% nelle donne. Questo risultato si ripete nella fatica localizzata nelle spalle, nelle braccia e nella schiena, dove la riduzione della fatica è maggiore per gli uomini piuttosto che per le donne. Infatti, la fatica nelle spalle risulta diminuita del 26.62% negli uomini e dell'11% nelle donne; nelle braccia lo sforzo per gli uomini si riduce del 20.62% mentre nelle donne la riduzione è pari all'11%; l'affaticamento sulla schiena è diminuito del 25% negli uomini e non è variato per le donne. Invece, attraverso l'uso dell'esoscheletro,

l'attività si è rivelata mediamente più semplice del 23.24% nei soggetti di sesso maschile e del 14.3% nei partecipanti di sesso femminile.

Allo stesso modo, il questionario intermedio per il test dinamico è stato compilato appena concluso il task dinamico ed ha fornito i seguenti dati:

soggetto	sforzo	fatica spalle	fatica braccia	fatica schiena	attività
s1	-15%	-15%	-5%	0	+28.6%
s2	-10%	-25%	-5%	-5%	+14.3%
s3	-30%	-25%	-25%	-15%	+42.9%
s4	-20%	-30%	-10%	-30%	+28.6%
s5	+10%	-10%	-15%	-15%	+14.3%
s6	-25%	-25%	-20%	-30%	+14.3%
s7	-5%	-5%	0	0	0
s8	+5%	+5%	+5%	0	-14.3%
<b>media</b>	<b>-11.25%</b>	<b>-16.25%</b>	<b>-9.37%</b>	<b>-11.87%</b>	<b>+16.09%</b>

Table 5: Risultati del questionario intermedio per il test dinamico degli uomini: percentuali che esprimono le differenze nelle valutazioni dei partecipanti dopo aver svolto il test con e senza esoscheletro

soggetto	sforzo	fatica spalle	fatica braccia	fatica schiena	attività
s9	-10%	+10%	0	0	-14.3%
s10	-10%	-5%	+5%	-7%	+14.3%
s11	+5%	+10%	+5%	0	0
s12	-30%	-30%	-40%	-20%	+14.3%
s13	+10%	0	+25%	0	0
<b>media</b>	<b>-7%</b>	<b>-3%</b>	<b>-1%</b>	<b>-5.4%</b>	<b>+2.86%</b>

Table 6: Risultati del questionario intermedio per il test dinamico delle donne: percentuali che esprimono le differenze nelle valutazioni dei partecipanti dopo aver svolto il test con e senza esoscheletro

Dalle tabelle ricavate dal test dinamico, notiamo che lo sforzo complessivo diminuisce se si indossa l'esoscheletro, rispettivamente dell'11.25% per gli uomini e del 7% per le donne. Anche la fatica localizzata su spalle, braccia e schiena diminuisce maggiormente nei soggetti di sesso maschile piuttosto che in quelli di sesso femminile. Infatti, la riduzione dell'affaticamento localizzato su spalle, braccia e schiena risulta, rispettivamente, diminuito del 16.25%, 9,37% e 11.87%



negli uomini, e del 3%, 1% e 5.4% nelle donne. Per quanto riguarda l'attività complessiva, mediante l'uso dell'esoscheletro essa risulta essere più semplice del 16.09% per gli uomini e del 2.86% per le donne.

Quindi, complessivamente, entrambi i questionari intermedi hanno riscontrato opinioni positive nell'utilizzo del Paexo Shoulder.

Infine, dal questionario finale possiamo ricavare le seguenti informazioni:

	s9	s10	s11	s12	s13	media $\pm \sigma$
piacevole	3	3	4	5	4	3.8 $\pm$ 0.75
facile da apprendere	7	6	7	7	5	6.4 $\pm$ 0.80
ergonomico	5	5	3	5	5	4.6 $\pm$ 0.80
di supporto	4	4	3	5	5	4.2 $\pm$ 0.75
facile	6	5	7	7	5	6.0 $\pm$ 0.89
soddisfa le aspettative	5	4	3	6	3	4.2 $\pm$ 1.17
efficiente	5	4	3	7	4	4.6 $\pm$ 1.35
sicuro	6	6	7	7	6	6.4 $\pm$ 0.49
leggero	6	4	4	7	5	5.2 $\pm$ 1.17
utile	5	3	2	6	4	4.0 $\pm$ 1.41
media $\pm \sigma$	5.2 $\pm$ 1.13	4.4 $\pm$ 1.09	4.3 $\pm$ 1.34	6.2 $\pm$ 0.84	4.6 $\pm$ 0.52	

Table 7: Risultati del questionario finale delle donne: valutazioni fornite dai partecipanti dopo aver svolto entrambi i test con e senza esoscheletro. Viene calcolata media  $\pm$  deviazione standard ( $\sigma$ ) dei punteggi assegnati ad ogni aggettivo e dei punteggi dati da ogni soggetto

	s1	s2	s3	s4	s5	s6	s7	s8	media $\pm \sigma$
piacevole	5	3	6	3	5	6	5	5	4.75 $\pm$ 1.09
facile da apprendere	6	6	7	6	6	6	6	6	6.12 $\pm$ 0.33
ergonomico	4	5	6	5	5	6	6	6	5.37 $\pm$ 0.70
di supporto	6	6	7	7	6	6	4	5	5.87 $\pm$ 0.93
facile	6	5	7	6	6	6	5	6	5.87 $\pm$ 0.60
soddisfa le aspettative	6	6	6	6	4	6	6	6	5.75 $\pm$ 0.66
efficiente	6	6	6	7	4	7	6	6	6.00 $\pm$ 0.87
sicuro	6	6	7	6	6	6	7	6	6.25 $\pm$ 0.43
leggero	6	7	7	6	5	6	6	6	6.12 $\pm$ 0.60
utile	6	6	7	7	5	7	6	6	6.25 $\pm$ 0.66
media $\pm \sigma$	5.7 $\pm$ 0.64	5.6 $\pm$ 1.02	6.6 $\pm$ 0.49	5.9 $\pm$ 1.14	5.2 $\pm$ 0.75	6.2 $\pm$ 0.40	5.7 $\pm$ 0.78	5.8 $\pm$ 0.40	

Table 8: Risultati del questionario finale degli uomini: valutazioni fornite dai partecipanti dopo aver svolto entrambi i test con e senza esoscheletro. Viene calcolata media  $\pm$  deviazione standard ( $\sigma$ ) dei punteggi assegnati ad ogni aggettivo e dei punteggi dati da ogni soggetto

Il questionario finale conferma quanto ricavato dai questionari intermedi. Infatti, i soggetti hanno giudicato positivamente il Paexo Shoulder sotto diversi punti di vista.

Nello specifico, i punteggi più elevati per gli uomini si riscontrano nella facilità di apprendimento, nell'efficienza, nella sicurezza, nella leggerezza e nell'utilità, i quali forniscono rispettivamente una media pari a 6.12, 6.00, 6.25, 6.12 e 6.25. Invece, le donne hanno fornito punteggi più elevati alla facilità di apprendimento, alla semplicità e alla sicurezza, con rispettive medie pari a 6.4, 6.0 e 6.4. Gli aggettivi i cui punteggi si discostano maggiormente dalla media sono la piacevolezza per gli uomini (1.09) e l'efficienza per le donne (1.35). Invece, i partecipanti che risultano avere una deviazione standard maggiore sono il soggetto 4 (1.14) ed il soggetto 11 (1.34). In aggiunta, i partecipanti che hanno giudicato più positivamente l'esoscheletro sono il soggetto 3, il soggetto 6 e il soggetto 12. Inoltre, viene confermato che l'esoscheletro si adatta maggiormente agli individui di sesso maschile e si rileva, in base ai commenti espressi dai partecipanti, che esso risulta essere più vantaggioso nel test statico piuttosto che in quello dinamico. Infatti, mentre nel test dinamico i soggetti hanno trovato delle difficoltà a svolgere il task con l'esoscheletro, nel test statico l'esoscheletro li ha aiutati a mantenere la posizione corretta e non abbassare il braccio.

Oltre a ciò, durante lo svolgimento del task statico, ogni 30 secondi, è stato chiesto a ciascun soggetto di valutare il grado di affaticamento in base alla scala di Borg CR10 e ciascuno di essi ha potuto interrompere l'attività se necessario.

Fatigue Scores												
	30"		1'		1'30"		2'		2'30"		3'	
soggetto	noexo	exo	noexo	exo	noexo	exo	noexo	exo	noexo	exo	noexo	exo
s1	3	2	4	3	5	3.5	7	4.5	7.5	5	-	5.5
s2	3	2	4	3	5	3.5	5	4	6	4.5	7	4.5
s3	2	1	4	1.5	5	2.5	6	3	6.5	4	7	4.5
s4	8.5	6	9	7.5	-	8.5	-	-	-	-	-	-
s5	4	3	6	6.5	7	8.5	8.5	9	10	9.5	-	9.5
s6	3	2	5	3	6	4.5	8	5.5	8.5	7	9	7.5
s7	3.5	3	4.5	4.5	6.5	5	7.5	5.5	8.5	6	9	6.5
s8	2.5	1.5	3	2	4.5	3	5.5	3	7.5	3.5	8	4.5
s9	3.5	3.5	4	4	5.5	4.5	7	5	7.5	6	7.5	7
s10	2.5	2	3	3	3.5	3.5	4	4	4.5	5	5	-
s11	3	2	5	4	7	5	9	6	-	8	-	9
s12	1.5	1	2	2	3	3	4	5	7	9	8	-
s13	3.5	3	4.5	3.5	6	4	6.5	4	7.5	5	8	5

Table 9: Fatigue Scores registrati ogni 30" di tutti i soggetti, sia con indosso l'esoscheletro sia senza di esso

Dalla tabella si può ricavare che l'esoscheletro ha aiutato i soggetti a svolgere il task. Si può vedere nel test senza esoscheletro sia punteggi di affaticamento più alti, sia durate più brevi, cioè i partecipanti hanno interrotto prima l'attività perché raggiunta la fatica. Infatti, i soggetti 4, 5 e 11 hanno interrotto il test prima quando non utilizzavano il Paexo Shoulder, evidenziando come l'esoscheletro abbia contribuito a prolungare la loro resistenza durante l'attività.

Quindi, complessivamente, dall'analisi soggettiva si deduce che i partecipanti hanno avuto un'esperienza positiva con il Paexo Shoulder, riconoscendone l'efficacia e il supporto che esso fornisce. In particolare, l'esoscheletro ha permesso una riduzione percepita della fatica rispetto alle condizioni senza ausilio. Tuttavia, va sottolineato che le risposte individuali sono varie, evidenziando come l'efficacia del dispositivo possa dipendere anche da fattori personali e specifici compiti svolti.

### 3.2 Risultati dell'analisi oggettiva

Per quanto concerne l'analisi oggettiva, essa deriva dallo studio del segnale elettromiografico prodotto da specifici muscoli nei quali vengono applicate le sonde. Tale segnale è stato analizzato tramite Matlab, che ha consentito di ricavare grafici che evidenziano la differente attività muscolare nello svolgimento del task con l'esoscheletro (segnale blu) e senza l'esoscheletro (segnale rosso).

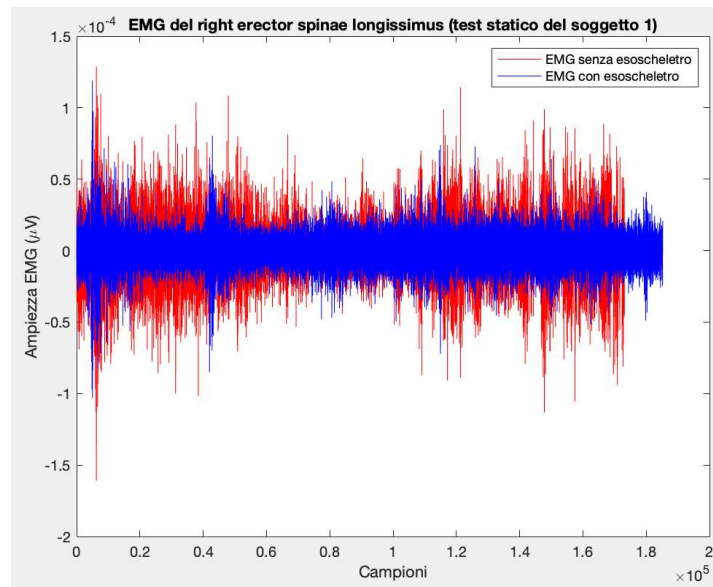


Figure 26: EMG del right erector spinae longissimus del soggetto 1 senza l'esoscheletro sovrapposto a quello ottenuto con l'esoscheletro durante il test statico

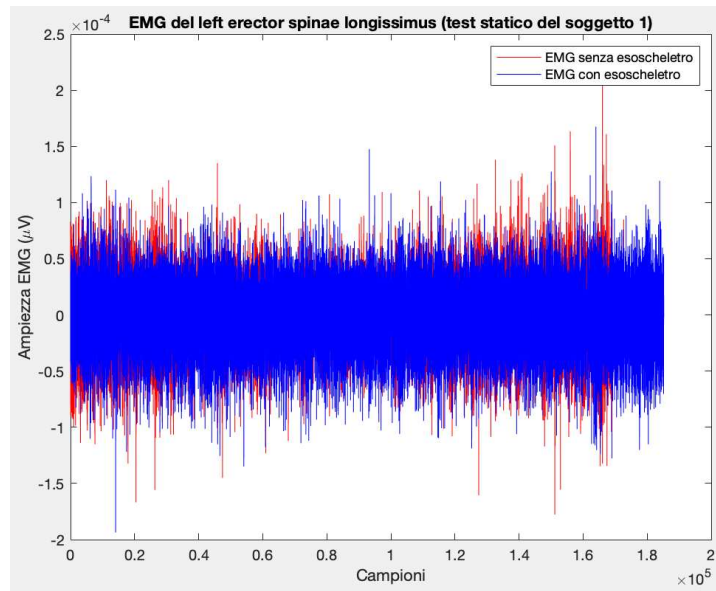


Figure 27: EMG del left erector spinae longissimus del soggetto 1 senza l'esoscheletro sovrapposto a quello ottenuto con l'esoscheletro durante il test statico

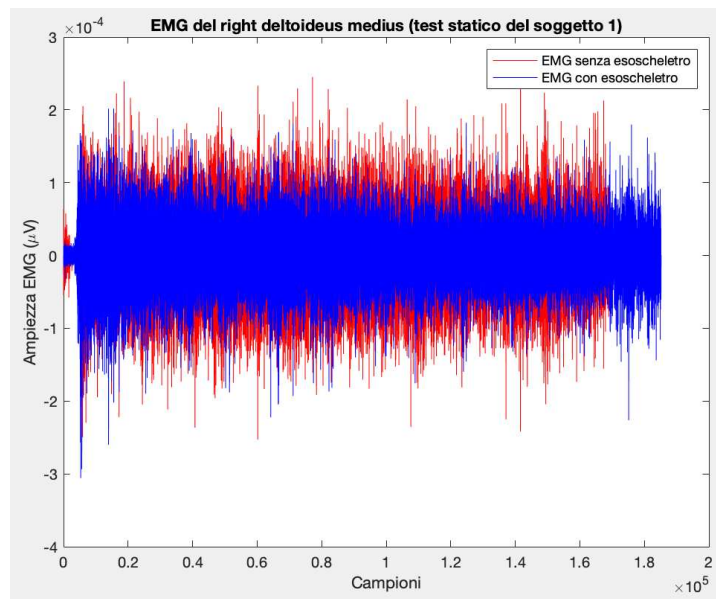


Figure 28: EMG del right deltoideus medius del soggetto 1 senza l'esoscheletro sovrapposto a quello ottenuto con l'esoscheletro durante il test statico

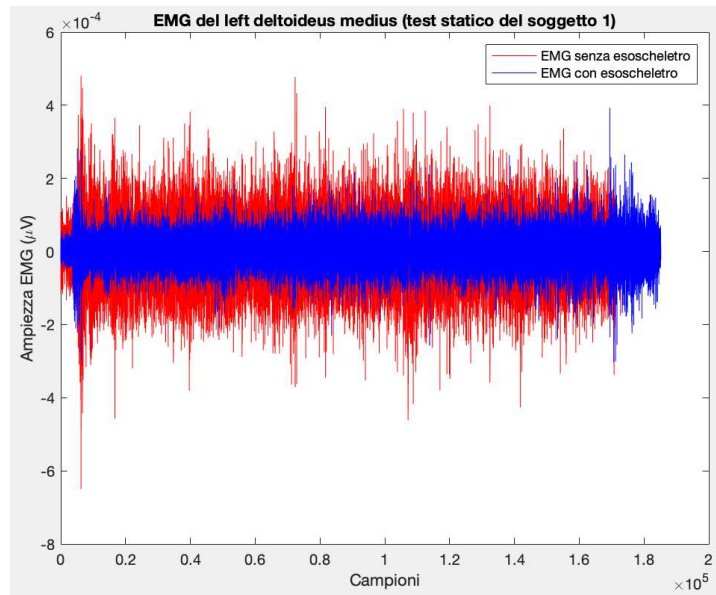


Figure 29: EMG del left deltoideus medius del soggetto 1 senza l'esoscheletro sovrapposto a quello ottenuto con l'esoscheletro durante il test statico

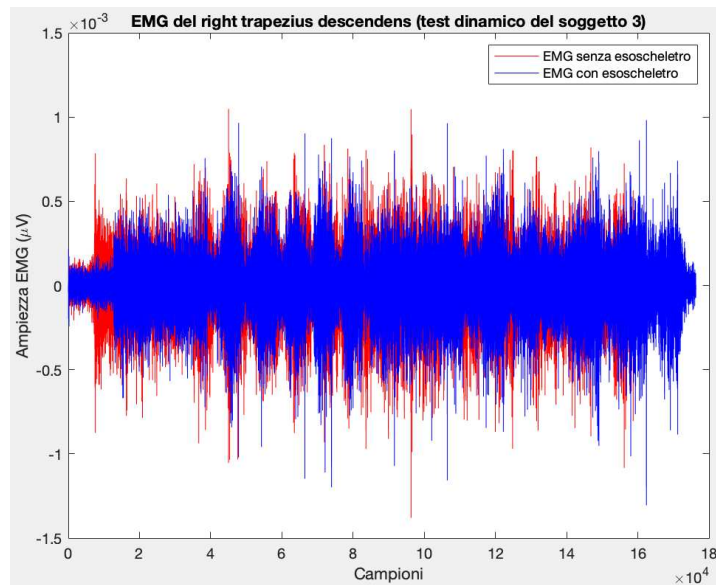


Figure 30: EMG del right trapezius descendens del soggetto 3 senza l'esoscheletro sovrapposto a quello ottenuto con l'esoscheletro durante il test dinamico

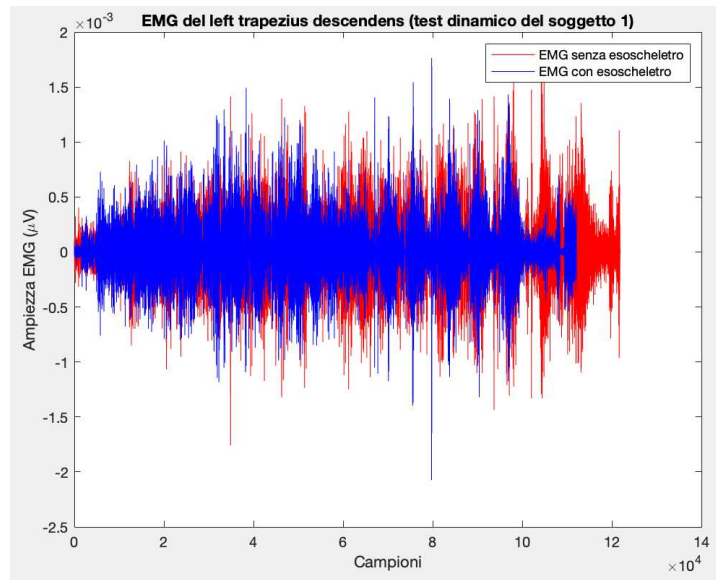


Figure 31: EMG del left trapezius descendens del soggetto 1 senza l'esoscheletro sovrapposto a quello ottenuto con l'esoscheletro durante il test dinamico

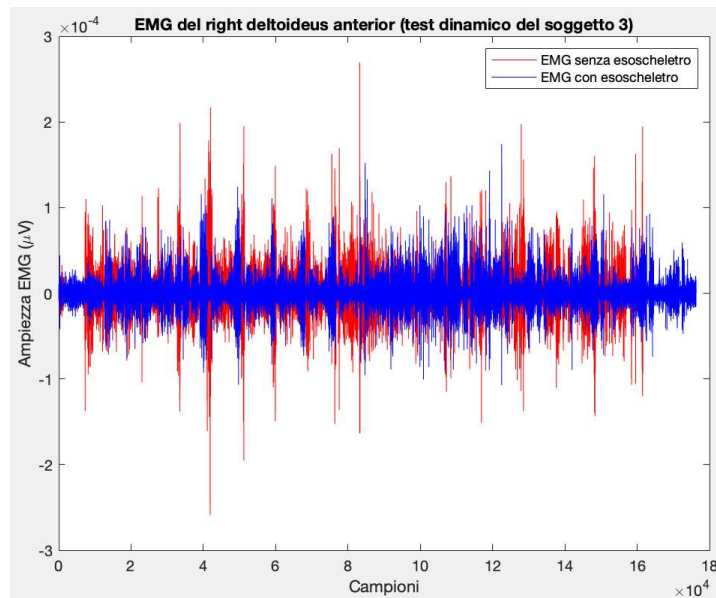


Figure 32: EMG del right deltoideus anterior del soggetto 3 senza l'esoscheletro sovrapposto a quello ottenuto con l'esoscheletro durante il test dinamico

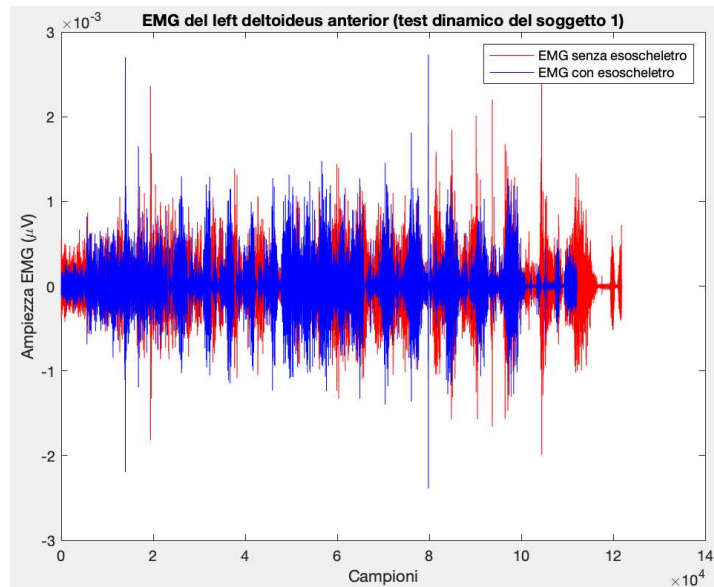


Figure 33: EMG del left deltoideus anterior del soggetto 1 senza l'esoscheletro sovrapposto a quello ottenuto con l'esoscheletro durante il test dinamico

Possiamo osservare che, in generale, la contrazione muscolare registrata nell'esecuzione del test senza esoscheletro è più elevata rispetto al caso in cui si ricorra all'ausilio del Paexo Shoulder. Infatti, sovrapponendo il tracciato ottenuto senza esoscheletro e quello ricavato indossando l'esoscheletro è evidente che l'ampiezza dell'EMG ottenuto dall'esecuzione del test con l'esoscheletro è ridotta rispetto a quando non si utilizza il dispositivo. In particolare, nel test statico notiamo delle variazioni più importanti rispetto al test dinamico. Infatti, dai grafici ottenuti dal test dinamico non sembrerebbero esserci delle variazioni in ampiezza significative. Il test statico, invece, rivela un segnale EMG più vario. Infatti, nel left erector spinae longissimus i tracciati ottenuti con e senza Paexo Shoulder sono molto simili, mentre nel left deltoideus medius la variazione di ampiezza che si ricava indossando l'esoscheletro è più evidente.

Inoltre, si è rivelata interessante la differenza di contrazione massima, con e senza esoscheletro, dei singoli muscoli in analisi, ma anche la variazione media, in percentuale, della contrazione massima degli 8 muscoli per ciascun soggetto. I due test hanno fornito i seguenti risultati:



soggetto	RESL	LESLS	RDM	LDM	RTD	LTD	RDA	LDA
s1	-30.98%	-19.47%	-12.17%	-25.26%	-26.08%	-37.37%	+234.79%	-38.66%
s2	-47.05%	-40.80%	-30.60%	-35.41%	+63.79%	+28.72%	-25.88%	-40.42%
s3	-59.57%	-42.11%	-58.46%	-58.56%	-44.33%	-34.69%	+121.02%	+74.10%
s4	+11.49%	+16.75%	-41.32%	-46.61%	-48.25%	-46.76%	-35.40%	-55.41%
s5	+118.53%	+12.96%	-39.35%	-1.41%	+301.14%	+465.49%	-7.77%	-28.70%
s6	-72.42%	-34.17%	-42.25%	-14.07%	-29.4%	-48.37%	-35.67%	-14.41%
s7	-87.44%	-30.20%	-17.28%	-23.11%	+34.25%	-49.05%	-11.95%	-19.06%
s8	+86.81%	+103.17%	-42.64%	-58.17%	+17.99%	-16.04%	-48.42%	-37.74%
<b>complessivo</b>	-10.08%	-3.26%	-35.51%	-32.82%	+33.64%	+32.74%	+23.84%	-20.04%

Table 10: variazione in percentuale della massima contrazione muscolare che si evidenzia negli uomini se si indossa o non si indossa l'esoscheletro durante lo svolgimento del test statico

<b>soggetto</b>	<b>RESL</b>	<b>LESL</b>	<b>RDM</b>	<b>LDM</b>	<b>RTD</b>	<b>LTD</b>	<b>RDA</b>	<b>LDA</b>
s9	-32.15%	-40.66%	-33.72%	-7.46%	-34.01%	+156.55%	+78.77%	+29.67%
s10	+7.09%	-33.45%	+4.72%	-33.88%	-20.52%	-13.95%	-6.64%	-13.87%
s11	+4.04%	+4.75%	+61.22%	+120.55%	+109.72%	+66.95%	-28.02%	+62.78%
s12	-48.08%	-61.62%	-29.94%	-43.43%	-22.88%	-17.79%	-48.05%	+16.91%
s13	-23.47%	+7.12%	-5.79%	-63.57%	-19.24%	+46.03%	+23.47%	-31.72%
<b>complessivo</b>	<b>-18.51%</b>	<b>-24.77%</b>	<b>-0.70%</b>	<b>-5.56%</b>	<b>+2.61%</b>	<b>+47.56%</b>	<b>+3.91%</b>	<b>+12.75%</b>

Table 11: variazione in percentuale della massima contrazione muscolare che si evidenzia nelle donne se si indossa o non si indossa l'esoscheletro durante lo svolgimento del test statico

<b>soggetto</b>	<b>RESL</b>	<b>LES�</b>	<b>RDM</b>	<b>LDM</b>	<b>RTD</b>	<b>LTD</b>	<b>RDA</b>	<b>LDA</b>
s1	-2.16%	+27.79%	+10.41%	-55.46%	-24.16%	+27.46%	+80.38%	-2.08%
s2	-20.77%	-60.44%	-46.75%	-12.21%	+183.7%	-34.40%	-46.38%	-32.87%
s3	-51.71%	-19.37%	-37.36%	-33.39%	-3.85%	-9.35%	-39.98%	+38.58%
s4	+13.77%	-6.18%	-48.48%	-64.12%	-11.38%	-32.67%	-25.15%	-33.60%
s5	+50.52%	-81.00%	+19.63%	-11.32%	-47.41%	+14.00%	-26.59%	+63.84%
s6	+4.59%	+5.60%	-27.49%	-23.46%	-47.55%	-31.60%	-23.72%	-20.96%
s7	+54.08%	+0.08%	+1.98%	-31.56%	-23.67%	+18.30%	-12.65%	-24.57%
s8	+26.90%	+47.52%	-42.57%	-66.98%	-44.38%	-31.40%	-8.16%	-24.10%
<b>complessivo</b>	+9.4%	-10.75%	-17.08%	-37.41%	-2.34%	-9.96%	-12.78%	-4.47%

Table 12: variazione in percentuale della massima contrazione muscolare che si evidenzia negli uomini se si indossa o non si indossa l'esoscheletro durante lo svolgimento del test dinamico

soggetto	RESL	LESL	RDM	LDM	RTD	LTD	RDA	LDA
s9	-25.81%	-5.09%	-15.80%	-15.78%	-19.68%	-45.26%	+50.80%	+110.41%
s10	-6.95%	-38.74%	-5.81%	-28.00%	-15.10%	-49.48%	-5.11%	+14.85%
s11	+17.77%	+14.99%	+43.26%	+4.14%	+22.03%	-20.28%	-62.47%	-22.93%
s12	+10.17%	-6.12%	-23.47%	-52.87%	+1.22%	-33.95%	+2.43%	-20.23%
s13	+71.79%	+101.97%	+19.78%	+8.68%	-16.18%	-30.74%	+5.36%	-8.58%
<b>complessivo</b>	+13.39%	+13.40%	+3.59%	-16.77%	-5.54%	-35.94%	-1.80%	+14.70%

Table 13: variazione in percentuale della massima contrazione muscolare che si evidenzia nelle donne se si indossa o non si indossa l'esoscheletro durante lo svolgimento del test dinamico

Il test statico degli uomini consente di ricavare i seguenti dati: il right erector spinae longissimus (RESL) subisce, in media, una diminuzione della contrazione del 10.08%; il left erector spinae longissimus (LESL) riscontra, mediamente, una riduzione nella contrazione pari al 3.26%; il right deltoideus medius (RDM) presenta, in media, una diminuzione della contrazione del 35.51%; il left deltoideus medius (LDM) ha, mediamente, una riduzione nella contrazione del 32.82%; il right trapezius descendens (RTD) evidenzia, in media, una crescita nella contrazione del 33.64%; il left trapezius descendens (LTD) subisce, mediamente, un aumento di contrazione del 32.74%; il right deltoideus anterior (RDA) evidenzia, mediamente, una crescita nella contrazione del 23.84%; il left deltoideus anterior (LDA) presenta, in media, una riduzione della contrazione del 20.04%. Inoltre, si evidenzia che il 75% dei soggetti ha riscontrato una riduzione della fatica.

Dal test statico delle donne si ottengono le seguenti informazioni: il right erector spinae longissimus (RESL) subisce, in media, una riduzione della contrazione del 18.51%; il left erector spinae longissimus (LESL) riscontra, mediamente, una diminuzione della contrazione pari al 24.77%; il right deltoideus medius (RDM) presenta, in media, una riduzione nella contrazione del 0.70%; il left deltoideus medius (LDM) ha, mediamente, una riduzione nella contrazione del 5.56%; il right trapezius descendens (RTD) evidenzia, in media, un aumento nella contrazione del 2.61%; il left trapezius descendens (LTD) subisce, mediamente, una crescita nella contrazione del 47.56%; il right deltoideus anterior (RDA) evidenzia, mediamente, una crescita nella contrazione del 3.91%; il left deltoideus anterior (LDA) presenta, in media, un aumento della contrazione del 12.75%. In aggiunta, si osserva che il 60% dei soggetti ha evidenziato una diminuzione dell'affaticamento.

Il test dinamico degli uomini fornisce i seguenti risultati: il right erector spinae longissimus (RESL) subisce, in media, un aumento di contrazione del 9.4%; il left erector spinae longissimus (LESL) riscontra, mediamente, una riduzione nella contrazione pari al 10.75%; il right deltoideus medius (RDM) presenta, in media, una diminuzione della contrazione del 17.08%; il left deltoideus medius (LDM) ha, mediamente, una riduzione nella contrazione del 37.31%; il right trapezius descendens (RTD) evidenzia, in media, una diminuzione della contrazione del 2.34%; il left trapezius descendens (LTD) subisce, mediamente, una diminuzione di contrazione del 9.96%; il right deltoideus anterior (RDA) evidenzia, mediamente, una riduzione nella contrazione del 12.78%; il left deltoideus anterior (LDA) presenta, in media, una riduzione della contrazione del 4.47%. Inoltre, l'87.5% dei partecipanti ha avuto esito positivo, evidenziando una riduzione dell'affaticamento.

Dal test dinamico delle donne risultano le seguenti informazioni: il right erector spinae longissimus (RESL) subisce, in media, un aumento di contrazione del 13.39%; il left erector spinae longissimus (LESL) riscontra, mediamente, un aumento nella contrazione pari al 13.4%; il right deltoideus medius (RDM)

presenta, in media, una crescita nella contrazione del 3.59%; il left deltoideus medius (LDM) ha, mediamente, una riduzione nella contrazione del 16.77%; il right trapezius descendens (RTD) evidenzia, in media, una diminuzione della contrazione del 5.54%; il left trapezius descendens (LTD) subisce, mediamente, una diminuzione di contrazione del 35.94%; il right deltoideus anterior (RDA) evidenzia, mediamente, una riduzione nella contrazione del 1.8%; il left deltoideus anterior (LDA) presenta, in media, un aumento della contrazione del 14.7%. Il 60% delle donne hanno riscontrato una riduzione della fatica nello svolgimento del task con l'esoscheletro.

Complessivamente, mentre gli uomini mostrano generalmente una maggiore riduzione della fatica, le donne rivelano risultati misti a seconda del muscolo analizzato. Inoltre, il test statico rivela variazioni più significative rispetto al test dinamico, evidenziando l'importanza del contesto nell'efficacia del Paexo Shoulder.

Un altro parametro valutato è l'RMS, il "Root Mean Square". Nello specifico, è risultato interessante plottare sovrapposti il segnale ottenuto senza esoscheletro (segnale rosso) e quello con l'esoscheletro (segnale blu).

I due test hanno prodotto i seguenti tracciati:

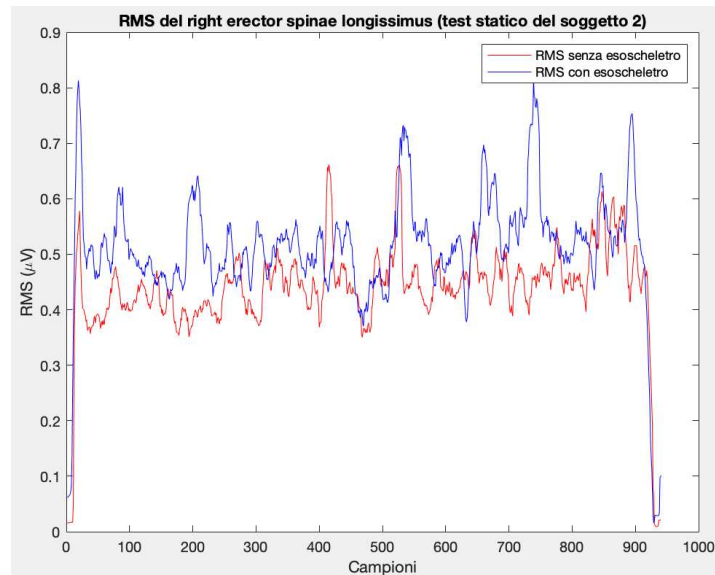


Figure 34: RMS del right erector spinae longissimus del soggetto 2 senza l'esoscheletro sovrapposto a quello ottenuto con l'esoscheletro durante il test statico

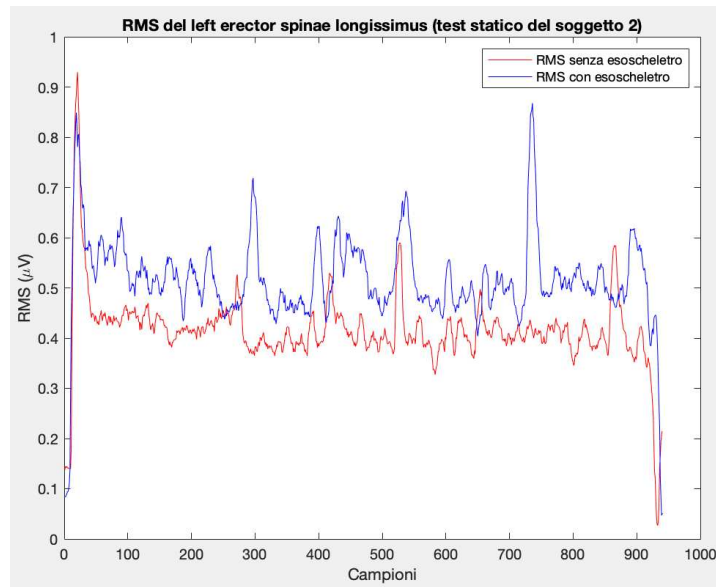


Figure 35: RMS del left erector spinae longissimus del soggetto 2 senza l'esoscheletro sovrapposto a quello ottenuto con l'esoscheletro durante il test statico

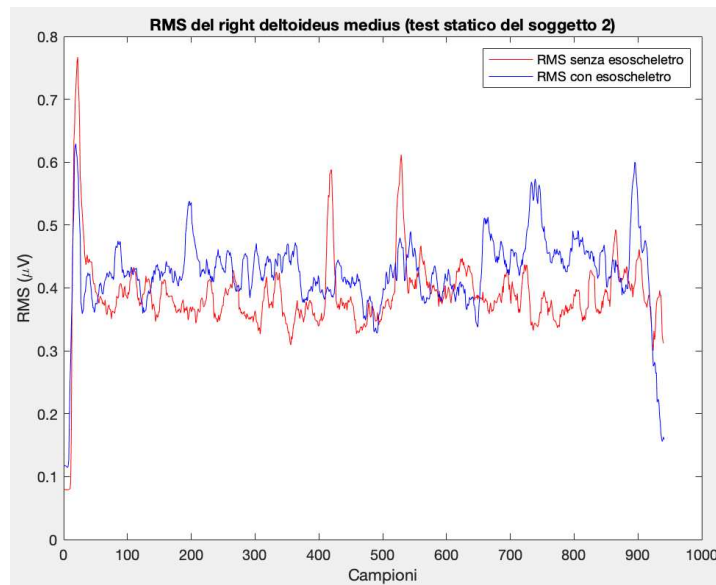


Figure 36: RMS del right deltoideus medius del soggetto 2 senza l'esoscheletro sovrapposto a quello ottenuto con l'esoscheletro durante il test statico

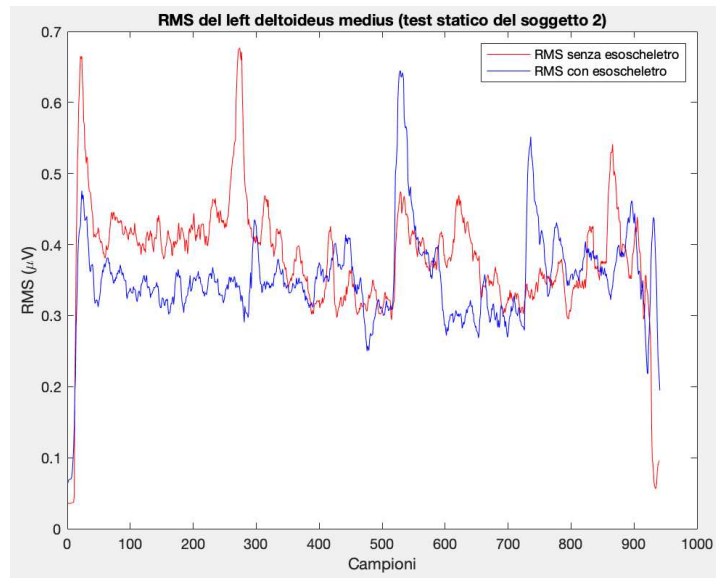


Figure 37: RMS del left deltoideus medius del soggetto 2 senza l'esoscheletro sovrapposto a quello ottenuto con l'esoscheletro durante il test statico

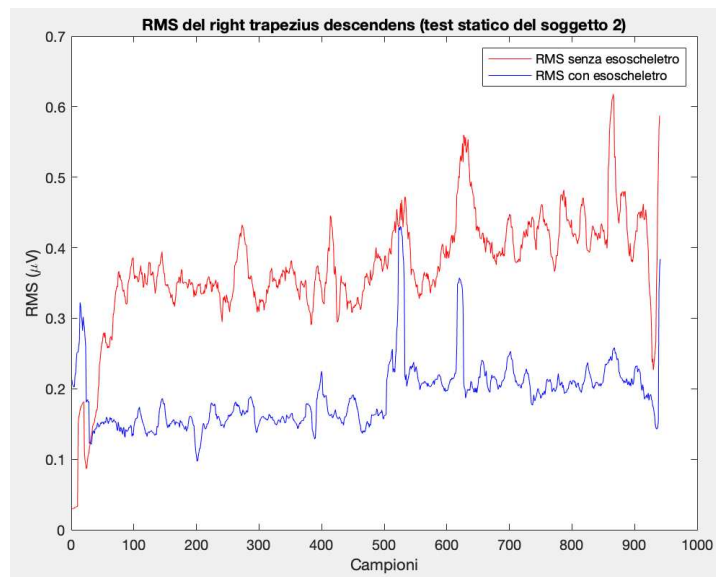


Figure 38: RMS del right trapezius descendens del soggetto 2 senza l'esoscheletro sovrapposto a quello ottenuto con l'esoscheletro durante il test statico



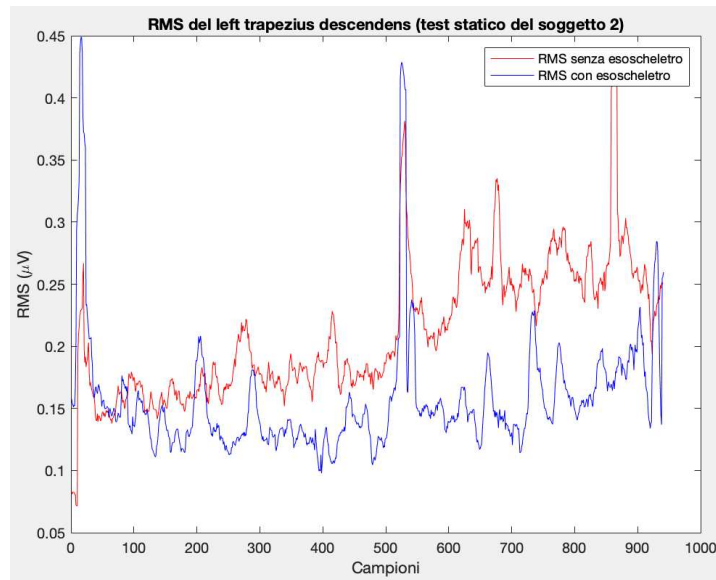


Figure 39: RMS del left trapezius descendens del soggetto 2 senza l'esoscheletro sovrapposto a quello ottenuto con l'esoscheletro durante il test statico

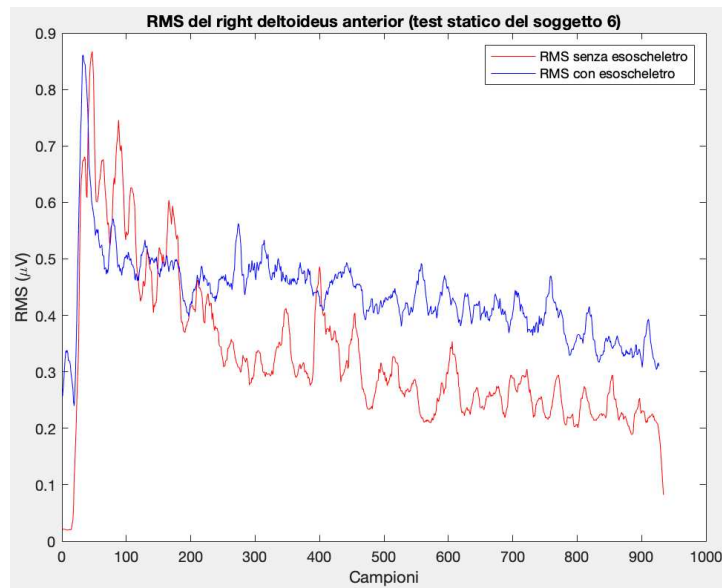


Figure 40: RMS del right deltoideus anterior del soggetto 6 senza l'esoscheletro sovrapposto a quello ottenuto con l'esoscheletro durante il test statico

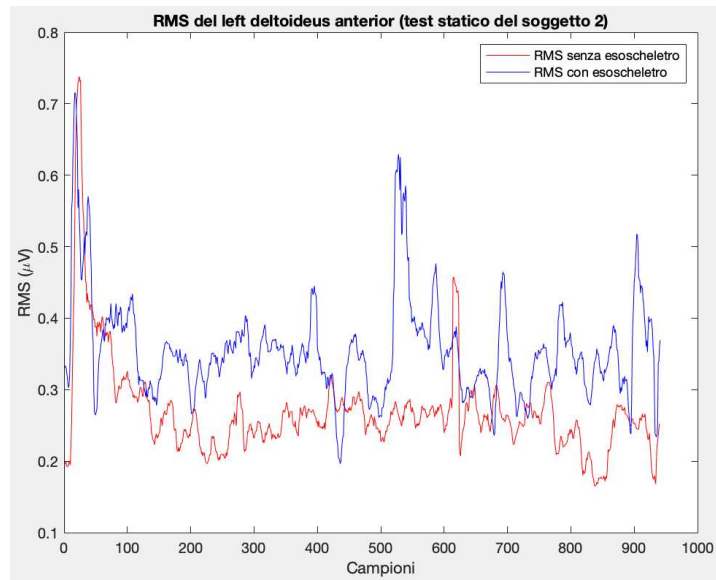


Figure 41: RMS del left deltoideus anterior del soggetto 2 senza l'esoscheletro sovrapposto a quello ottenuto con l'esoscheletro durante il test statico

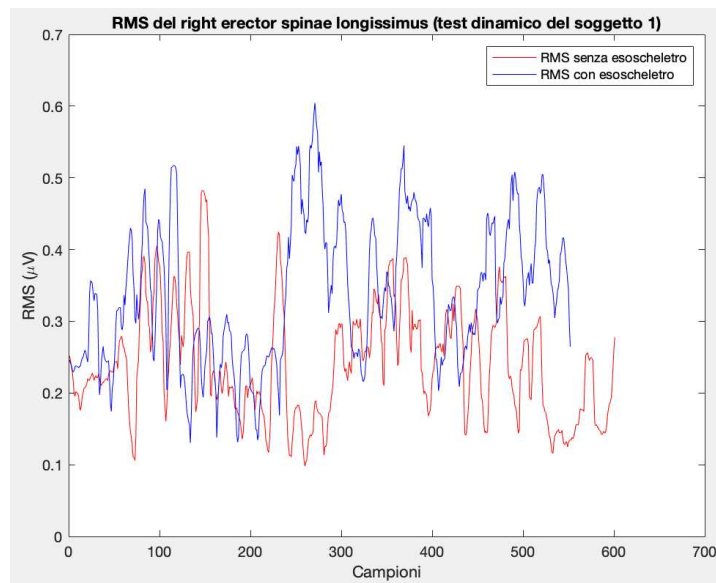


Figure 42: RMS del right erector spinae longissimus del soggetto 1 senza l'esoscheletro sovrapposto a quello ottenuto con l'esoscheletro durante il test dinamico

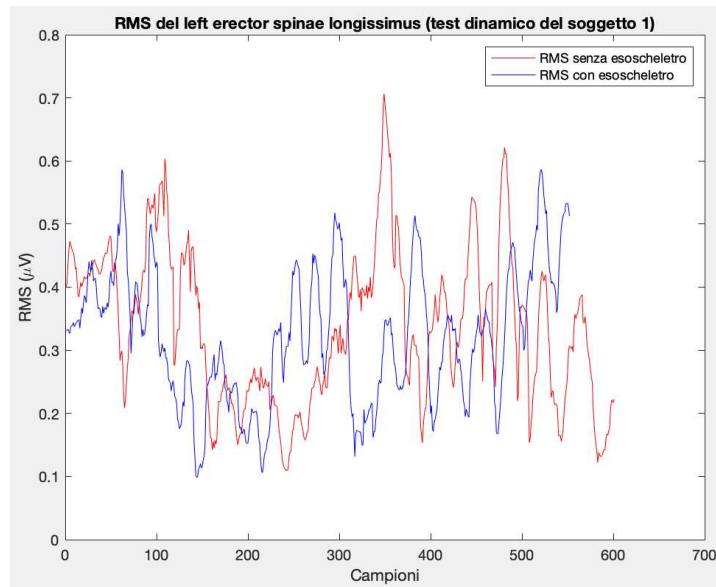


Figure 43: RMS del left erector spinae longissimus del soggetto 1 senza l'esoscheletro sovrapposto a quello ottenuto con l'esoscheletro durante il test dinamico

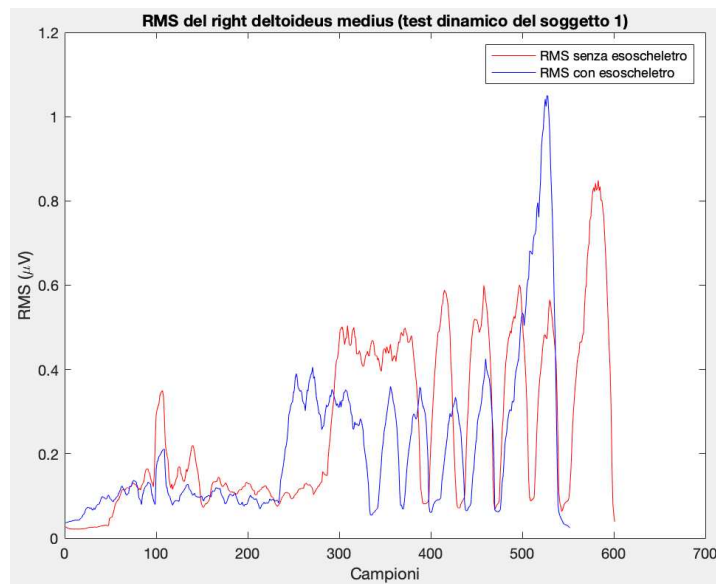


Figure 44: RMS del right deltoideus medius del soggetto 1 senza l'esoscheletro sovrapposto a quello ottenuto con l'esoscheletro durante il test dinamico

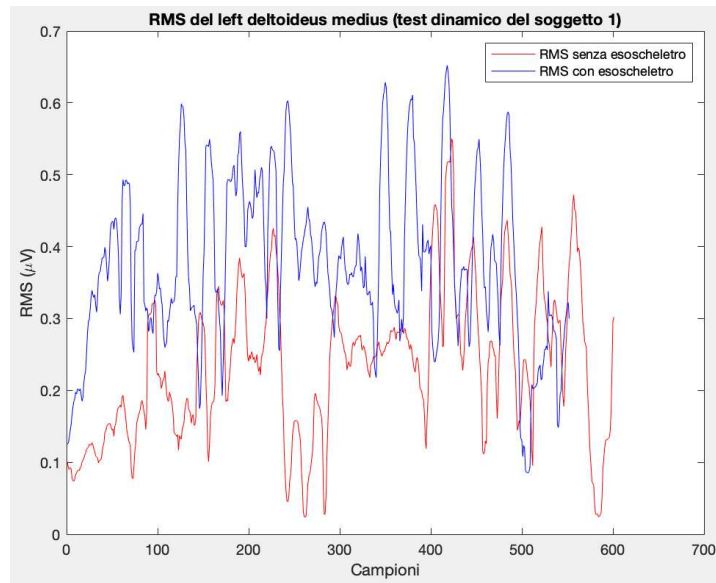


Figure 45: RMS del left deltoideus medius del soggetto 1 senza l'esoscheletro sovrapposto a quello ottenuto con l'esoscheletro durante il test dinamico

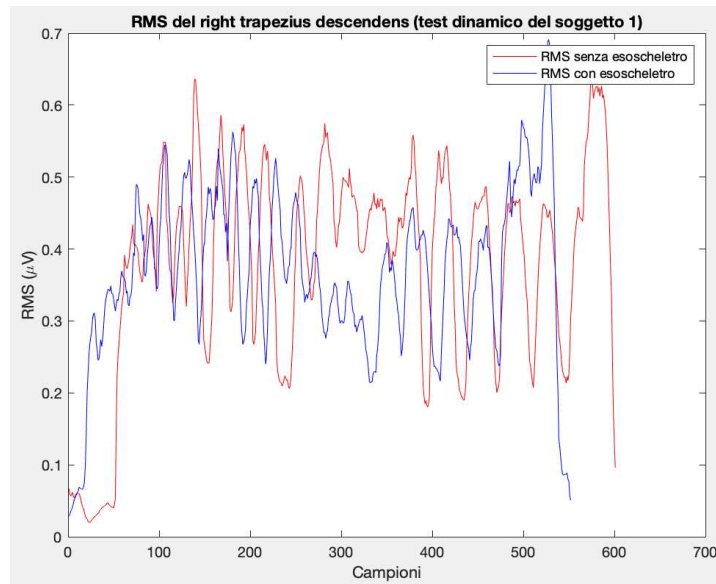


Figure 46: RMS del right trapezius descendens del soggetto 1 senza l'esoscheletro sovrapposto a quello ottenuto con l'esoscheletro durante il test dinamico

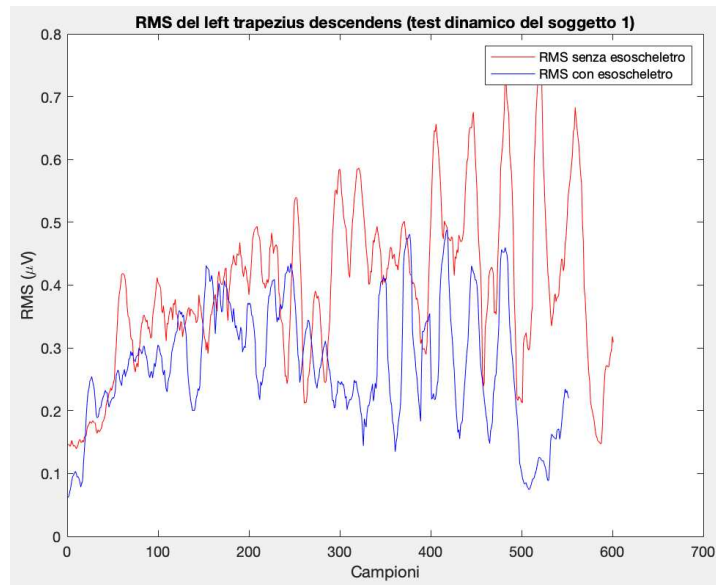


Figure 47: RMS del left trapezius descendens del soggetto 1 senza l'esoscheletro sovrapposto a quello ottenuto con l'esoscheletro durante il test dinamico

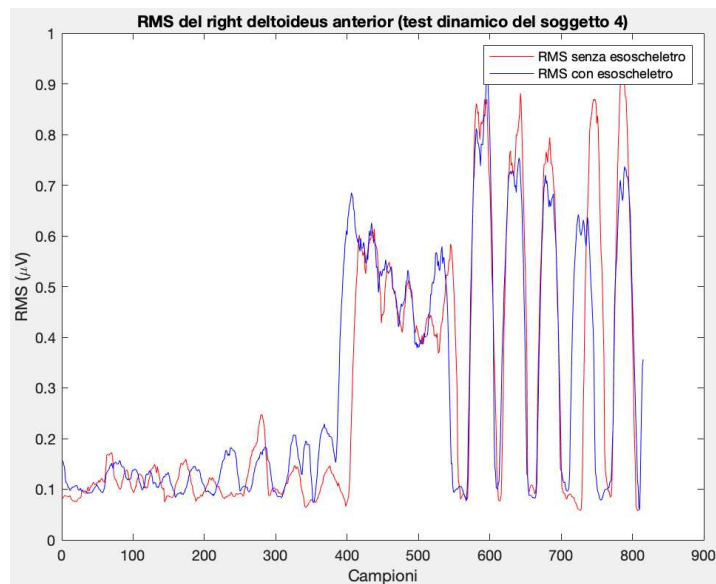


Figure 48: RMS del right deltoideus anterior del soggetto 4 senza l'esoscheletro sovrapposto a quello ottenuto con l'esoscheletro durante il test dinamico

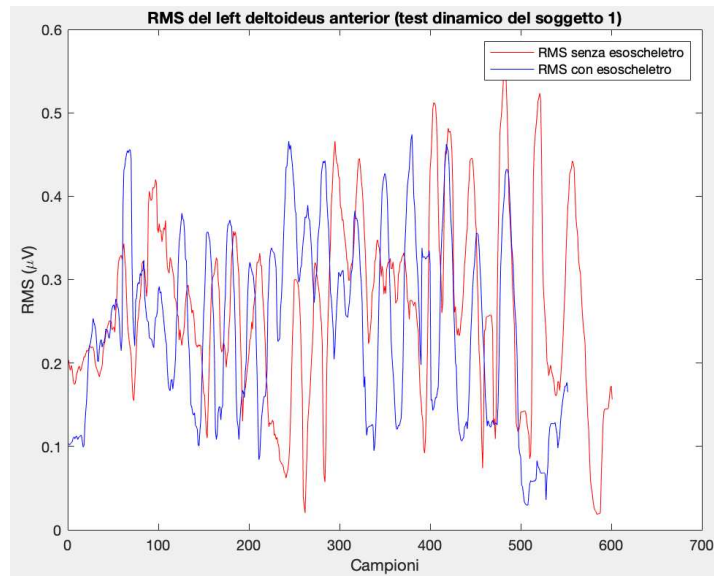


Figure 49: RMS del left deltoideus anterior del soggetto 1 senza l'esoscheletro sovrapposto a quello ottenuto con l'esoscheletro durante il test dinamico

Il plottaggio degli RMS rivela risultati contrastanti a seconda del muscolo in analisi e della tipologia di test. In alcuni casi, come nel right trapezius descendens del soggetto 2 durante il test statico o il left trapezius descendens del soggetto 1 nel test dinamico, l'uso dell'esoscheletro ha portato a una riduzione significativa dell'attività muscolare, espressa da un'ampiezza degli RMS inferiore rispetto alla condizione senza esoscheletro. Tuttavia, in altre situazioni, come nel left deltoideus anterior del soggetto 2 nel test statico e nel right deltoideus medius del soggetto 1 durante il test dinamico, si osserva un comportamento opposto, con un aumento dell'ampiezza degli RMS durante l'uso dell'esoscheletro. In aggiunta, i tracciati sembrerebbero rivelare prestazioni migliori nello svolgimento del test statico, piuttosto che in quello dinamico. Questo suggerisce che il Paexo Shoulder si adatta meglio a posizioni statiche anziché a movimenti dinamici.

Successivamente, sono stati valutati la media e la deviazione standard degli RMS. Nello specifico, ho considerato tutti gli RMS dei 13 soggetti, distinguendo i soggetti di sesso maschile da quelli di sesso femminile, e ne ho calcolato media e deviazione standard per ogni muscolo. Per valutare meglio lo sforzo muscolare con e senza esoscheletro è necessario considerare la media degli RMS insieme alla loro deviazione standard. Infatti, la media degli RMS consente di misurare l'intensità media della fatica muscolare, mentre la deviazione standard fornisce un'indicazione della variabilità di tale affaticamento.

Attività muscolare (%RMS)					
muscolo	noexo		exo		percentuale
	media	$\sigma$	media	$\sigma$	
right erector spinae longissimus	0.2458	0.1331	0.3644	0.2459	+61.08%
left erector spinae longissimus	0.3397	0.1906	0.3823	0.2408	+17.50%
right deltoideus medius	0.4692	0.1731	0.5323	0.1559	+7.14%
left deltoideus medius	0.5765	0.1569	0.4959	0.1718	-8.96%
right trapezius descendens	0.4762	0.1172	0.3465	0.2004	-7.84%
left trapezius descendens	0.4345	0.1529	0.3995	0.2273	+6.72%
right deltoideus anterior	0.3820	0.2008	0.3771	0.2395	+5.80%
left deltoideus anterior	0.4629	0.1678	0.5430	0.1575	+11.06%

Table 14: media  $\pm$  deviazione standard degli RMS durante il test statico degli uomini e percentuale che esprime la differenza tra i risultati ricavati dall'esecuzione del test senza l'esoscheletro e con esso

Attività muscolare (%RMS)					
muscolo	noexo		exo		percentuale
	media	$\sigma$	media	$\sigma$	
right erector spinae longissimus	0.4288	0.2638	0.4250	0.2258	-6.04%
left erector spinae longissimus	0.4512	0.2641	0.4517	0.1906	-10.21%
right deltoideus medius	0.5674	0.1492	0.5269	0.1792	-1.46%
left deltoideus medius	0.5439	0.1697	0.4943	0.1931	-3.67%
right trapezius descendens	0.4995	0.1829	0.4598	0.1948	-4.06%
left trapezius descendens	0.4173	0.1598	0.2700	0.1501	-27.23%
right deltoideus anterior	0.3711	0.1662	0.3177	0.1851	-6.42%
left deltoideus anterior	0.3241	0.1911	0.2552	0.1488	-21.59%

Table 15: media  $\pm$  deviazione standard degli RMS durante il test statico delle donne e percentuale che esprime la differenza tra i risultati ricavati dall'esecuzione del test senza l'esoscheletro e con esso

Attività muscolare (%RMS)					
muscolo	noexo		exo		percentuale
	media	$\sigma$	media	$\sigma$	
right erector spinae longissimus	0.2527	0.1546	0.2379	0.1833	+3.41%
left erector spinae longissimus	0.2986	0.1765	0.3118	0.1434	-4.20%
right deltoideus medius	0.3009	0.2063	0.3408	0.2272	+12.00%
left deltoideus medius	0.3165	0.1927	0.3350	0.1835	+1.80%
right trapezius descendens	0.3586	0.1760	0.3651	0.1758	+1.16%
left trapezius descendens	0.3267	0.1575	0.3211	0.1313	-6.57%
right deltoideus anterior	0.2848	0.2025	0.3126	0.1898	+3.09%
left deltoideus anterior	0.3605	0.1810	0.3330	0.1634	-8.33%

Table 16: media  $\pm$  deviazione standard degli RMS durante il test dinamico degli uomini e percentuale che esprime la differenza tra i risultati ricavati dall'esecuzione del test senza l'esoscheletro e con esso

Attività muscolare (%RMS)					
muscolo	noexo		exo		percentuale
	media	$\sigma$	media	$\sigma$	
right erector spinae longissimus	0.2225	0.1885	0.1880	0.1749	-11.72%
left erector spinae longissimus	0.2852	0.1598	0.2498	0.1575	-8.46%
right deltoideus medius	0.2738	0.1707	0.2625	0.1569	-5.66%
left deltoideus medius	0.2826	0.2012	0.2631	0.1900	-6.36%
right trapezius descendens	0.4236	0.1929	0.3545	0.1460	-18.83%
left trapezius descendens	0.2889	0.1432	0.2795	0.1601	+1.73%
right deltoideus anterior	0.2383	0.1892	0.2463	0.1423	-9.08%
left deltoideus anterior	0.2634	0.1237	0.2564	0.1266	-1.05%

Table 17: media  $\pm$  deviazione standard degli RMS durante il test dinamico delle donne e percentuale che esprime la differenza tra i risultati ricavati dall'esecuzione del test senza l'esoscheletro e con esso

Dal test statico degli uomini possiamo osservare risultati non favorevoli. Infatti, solamente il left deltoideus medius e il right trapezius presentano una riduzione dell'attività muscolare, rispettivamente pari all'8.96% e al 7.84%. Invece, i restanti muscoli in analisi evidenziano un aumento dell'affaticamento,



soprattutto in corrispondenza del right erector spinae longissimus, dove lo sforzo aumenta del 61.08% se si utilizza il dispositivo.

Per quanto riguarda il test statico delle donne, i risultati evidenziano una generale riduzione dello sforzo e dell'attività muscolare. I risultati più rilevanti si hanno in corrispondenza del left trapezius descendens, che rivela una riduzione pari al 27.23%, e del left deltoideus anterior, il quale mostra una diminuzione della fatica del 21.59%.

Il test dinamico per gli uomini ha fornito risultati simili a quelli presentati dal test statico. Infatti, solamente il left erector spinae longissimus, il left trapezius descendens e il left deltoideus anterior riscontrano una riduzione della fatica, rispettivamente pari al 4.20%, 6.57% e 8.33%. Gli altri muscoli in analisi evidenziano un aumento dello sforzo, tra i quali il maggiore si ha in corrispondenza del right deltoideus anterior, che presenta una crescita dell'affaticamento usando l'esoscheletro pari al 12%.

Infine, per quanto concerne il test dinamico delle donne, notiamo generalmente una riduzione dell'attività muscolare, soprattutto in corrispondenza del right trapezius descendens, il quale rivela una riduzione pari al 18.83%. Il left trapezius descendens è l'unico muscolo a evidenziare un aumento dell'affaticamento, anche se pari solamente all'1.73%.

Invece, se consideriamo la somma di media e deviazione standard degli RMS di un singolo soggetto, ad esempio del soggetto 1, si ottiene:

Attività muscolare (%RMS)					
muscolo	noexo		exo		percentuale
	media	$\sigma$	media	$\sigma$	
right erector spinae longissimus	0.3334	0.0934	0.3197	0.0759	-7.31%
left erector spinae longissimus	0.5155	0.1294	0.7090	0.0657	+20.12%
right deltoideus medius	0.5918	0.1187	0.4795	0.0940	-19.28%
left deltoideus medius	0.6125	0.0763	0.4167	0.0701	-29.32%
right trapezius descendens	0.4878	0.0909	0.3259	0.1035	-25.80%
left trapezius descendens	0.4377	0.0996	0.2794	0.1223	-25.23%
right deltoideus anterior	0.4319	0.0754	0.3400	0.2896	+24.10%
left deltoideus anterior	0.3897	0.0664	0.5605	0.0863	+41.82%

Table 18: media  $\pm$  deviazione standard degli RMS durante il test statico del soggetto 1 e percentuale che esprime la differenza tra i risultati ricavati dall'esecuzione del test senza l'esoscheletro e con esso

Attività muscolare (%RMS)					
muscolo	noexo		exo		percentuale
	media	$\sigma$	media	$\sigma$	
right erector spinae longissimus	0.2406	0.0786	0.3395	0.1008	+37.92%
left erector spinae longissimus	0.3365	0.1229	0.3230	0.1081	-6.15%
right deltoideus medius	0.2622	0.2009	0.2143	0.1880	-13.14%
left deltoideus medius	0.2339	0.1046	0.3762	0.1165	+45.57%
right trapezius descendens	0.3799	0.1474	0.3681	0.1181	-7.79%
left trapezius descendens	0.3962	0.1306	0.2719	0.0965	-30.07%
right deltoideus anterior	0.2521	0.2086	0.1409	0.1503	-36.78%
left deltoideus anterior	0.2651	0.1102	0.2463	0.1103	-4.99%

Table 19: media  $\pm$  deviazione standard degli RMS durante il test dinamico del soggetto 1 e percentuale che esprime la differenza tra i risultati ricavati dall'esecuzione del test senza l'esoscheletro e con esso

Dal test statico ricaviamo che in 5 degli 8 muscoli in analisi l'attività muscolare diminuisce utilizzando l'esoscheletro. In particolare in corrispondenza del left erector spinae longissimus, del right deltoideus anterior, del left deltoideus medius, del right trapezius descendens e del left trapezius descendens si registrano delle riduzioni pari al 7.31%, 19.28%, 29.32%, 25.80% e 25.23%. I restanti muscoli riscontrano un aumento di contrazione pari al 20.12% per il left erector spinae longissimus, al 24.10% per il right deltoideus anterior e pari al 41.82% per il left deltoideus anterior.

Dal test dinamico, invece, osserviamo che 6 muscoli su 8 presentano una riduzione dell'attività muscolare. Tali muscoli sono il left erector spinae longissimus, il right deltoideus anterior, il right trapezius descendens, il left trapezius descendens, il right deltoideus anterior e il left deltoideus anterior, i quali presentano una riduzione rispettivamente del 6.15%, 13.14%, 7.79%, 30.07%, 36.78% e del 4.99%. Il right erector spinae longissimus rivela un aumento dell'attività muscolare del 37.92%, mentre il left deltoideus medius evidenzia una crescita dello sforzo pari al 45.57%.

Inoltre, ho determinato tramite il test t-Student se le differenze presenti nell'esecuzione del task con l'esoscheletro o senza di esso siano significative, assumendo come p-value 0.05. Ho ottenuto i seguenti risultati:

<b>muscolo</b>	<b>p-value</b>
right erector spinae longissimus	p = 0.1763
left erector spinae longissimus	p = 0.2433
right deltoideus medius	p = 0.2681
left deltoideus medius	<b>p = 0.0263</b>
right trapezius descendens	p = 0.1603
left trapezius descendens	p = 0.7743
right deltoideus anterior	p = 0.8312
left deltoideus anteior	<b>p = 0.0042</b>

Table 20: t-test sul test statico uomini

Osserviamo che, per il test statico degli uomini, solamente il left deltoideus medius e il left deltoideus anterior hanno un p-value minore di 0.05, quindi una variazione significativa di contrazione muscolare. Nello specifico, il left deltoideus medius ha un p-value pari a 0.0263, mentre il left deltoideus anterior mostra un p-value di 0.0042.

<b>muscolo</b>	<b>p-value</b>
right erector spinae longissimus	p = 0.5414
left erector spinae longissimus	p = 0.8460
right deltoideus medius	p = 0.2861
left deltoideus medius	p = 0.5129
right trapezius descendens	p = 0.3388
left trapezius descendens	<b>p = 0.0126</b>
right deltoideus anterior	p = 0.7004
left deltoideus anteior	p = 0.2348

Table 21: t-test sul test statico donne

Il test statico delle donne fornisce una sola differenza significativa tra le medie delle misurazioni con e senza esoscheletro, in corrispondenza del left trapezius descendens, il quale presenta un p-value di 0.0126.

<b>muscolo</b>	<b>p-value</b>
right erector spinae longissimus	p = 0.9005
left erector spinae longissimus	p = 0.5772
right deltoideus medius	p = 0.2035
left deltoideus medius	p = 0.5009
right trapezius descendens	p = 0.9368
left trapezius descendens	p = 0.8161
right deltoideus anterior	p = 0.3548
left deltoideus anteior	p = 0.3878

Table 22: t-test sul test dinamico uomini

Durante il test dinamico degli uomini non si è registrata alcuna differenza significativa nell'esecuzione del task con l'ausilio dell'esoscheletro. Infatti, nessun muscolo rivela un p-value inferiore a 0.05.

<b>muscolo</b>	<b>p-value</b>
right erector spinae longissimus	<b>p = 0.0147</b>
left erector spinae longissimus	p = 0.5488
right deltoideus medius	p = 0.5248
left deltoideus medius	p = 0.8526
right trapezius descendens	p = 0.3392
left trapezius descendens	p = 0.9058
right deltoideus anterior	p = 0.5460
left deltoideus anteior	p = 0.9990

Table 23: t-test sul test dinamico donne

Infine, dal test dinamico delle donne ricaviamo una variazione significativa di contrazione muscolare in corrispondenza del right erector spinae longissimus, il quale ha un p-value pari a 0.0147.

Complessivamente, il Paexo Shoulder sembrerebbe avere la potenzialità di supportare l'uomo durante un'attività che richiede di rimanere con le braccia sollevate per tempi prolungati, ma solo in alcuni casi le variazioni che si riscontrano indossando l'esoscheletro sono rilevanti e significative.

## 4 Discussione e conclusioni

L'obiettivo che si è posto questo studio è stato quello di valutare se l'esoscheletro passivo Paexo Shoulder (Ottobock SE Co. KGaA, Duderstadt, Germania) sia una tecnologia valida a migliorare le condizioni di lavoro dell'operatore, rimanendo confortevole e semplice da utilizzare [25].

Infatti, lavori che richiedono di mantenere le braccia alzate, movimenti ripetitivi e posture scorrette sono spesso responsabili di disturbi muscolo-scheletrici, che causano dolore, rigidità o limitazioni funzionali. Perciò, è importante promuovere lo sviluppo e la diffusione di esoscheletri in grado di ridurre e prevenire questi disturbi, migliorando in tal modo le condizioni lavorative di chi li indossa [17][7][26].

I risultati ottenuti dai questionari hanno dimostrato come i partecipanti abbiano avuto un impatto positivo nell'indossare e utilizzare l'esoscheletro, ritenendolo utile ed efficiente. I soggetti evidenziano che il Paexo Shoulder li abbia aiutati a mantenere una postura corretta e sia stato in grado di ridurre lo stress sulla muscolatura delle spalle, ridistribuendo il carico ad altre zone corporee.

D'altra parte, seppur dai risultati provenienti dai questionari l'esoscheletro sembrerebbe in grado di ridurre l'affaticamento muscolare e, dunque, infortuni muscolo-scheletrici a lungo termine, dall'analisi oggettiva e statistica non si sono ricavati i risultati auspicati.

In effetti, dall'analisi oggettiva dei dati è emerso che l'uso dell'esoscheletro può portare anche ad un aumento dell'attività muscolare e, quindi, ad un sovraccarico biomeccanico. Ciò si è rivelato più evidente nel test dinamico, ma si ha la stessa problematica nel test statico. Del resto, i risultati ottenuti andando ad analizzare la massima contrazione muscolare, gli RMS, la loro media e la loro deviazione standard presentano delle discordanze rispetto agli obiettivi iniziali. Anche l'analisi statistica basata sul test t-Student ha evidenziato solo in pochi casi delle differenze significative nello svolgere le attività con o senza l'esoscheletro.

Importante è sottolineare che i soggetti sono stati sottoposti solo ad una breve fase di familiarizzazione, il che può aver influenzato la variabilità dei risultati ottenuti dai test. Infatti, il ridotto periodo di familiarizzazione ha permesso ai partecipanti di comprendere solo parzialmente il funzionamento e le capacità del Paexo Shoulder.

Ovviamente, ad influenzare la variabilità dei risultati sono anche fattori come le differenze antropometriche individuali, il livello di forza di base del partecipante e la sua condizione fisica. Infatti, in alcuni casi, prevalentemente per le donne, il Paexo Shoulder non riusciva ad adattarsi correttamente al corpo del partecipante.

Un limite è stato posto anche nella scelta del numero di partecipanti. Infatti, il ristretto numero di soggetti ha reso difficile individuare p-value sufficientemente bassi da poter valutare le differenze significative [15].

Quindi, sebbene i partecipanti abbiano espresso un giudizio positivo sull'uso del

Paexo Shoulder, i dati ottenuti dall'analisi elettromiografica suggeriscono una realtà più complessa. L'efficacia dell'esoscheletro sembrerebbe variare in base al muscolo e al tipo di movimento eseguito, e quindi è bene svolgere ulteriori approfondimenti per comprendere le condizioni specifiche in cui l'esoscheletro fornisce un vantaggio ergonomico. Ovviamente, è bene riconoscere quelli che sono i limiti del Paexo Shoulder, poiché ciò aiuta a comprendere meglio le situazioni in cui questo dispositivo possa essere più vantaggioso e dove sarebbe opportuno apportare dei miglioramenti [15].

I risultati sottolineano che il dispositivo è solo parzialmente efficace nell'ottimizzare le prestazioni durante le attività ripetitive e di lavori che richiedono di rimanere per tempi prolungati con le braccia sollevate. Infatti, l'interpretazione dei dati mostra che l'esoscheletro non sempre è in grado di ridurre lo sforzo muscolare, e suggerisce la necessità di adattare meglio il dispositivo alle esigenze del singolo utente ed ai diversi tipi di movimenti.

Lo studio, però, ci ha permesso anche di constatare come l'implementazione del Paexo Shoulder potrebbe essere un importante strumento per promuovere il benessere dei lavoratori. Infatti, l'esoscheletro potrebbe migliorare l'ergonomia, la sicurezza e la produttività nei luoghi di lavoro, favorendo una riduzione della percentuale di infortuni sul lavoro e prevenendo la comparsa di disturbi muscolo-scheletrici [15].

Futuri studi dovranno concentrarsi su come migliorare l'efficacia del Paexo Shoulder, specialmente in attività dinamiche, e su come educare gli utenti a utilizzarlo correttamente per massimizzarne i benefici.

Per ottimizzare le prestazioni dell'esoscheletro sarebbe auspicabile migliorare quello che è il design dello stesso, in modo tale da adattarlo alle diverse tipologie di utenti che ne potrebbero usufruire. Invece, per quanto riguarda l'educazione dei lavoratori, sarebbe utile introdurre, in contesti lavorativi quali l'edilizia o la manutenzione, dei seminari in cui vengono presentati e fatti indossare tali dispositivi.

Inoltre, sarebbe utile introdurre dei sensori e delle applicazioni che consentono di monitorare in tempo reale l'attività muscolare quando si indossa l'esoscheletro. In aggiunta, potrebbe essere interessante verificare quelli che sono i benefici nell'uso del Paexo Shoulder per tempi prolungati, in modo tale da analizzare come esso influenzi la salute muscolo-scheletrica e la produttività di chi lo indossa [14].

In conclusione, investire in tecnologie quali il Paexo Shoulder può essere un passo significativo verso ambienti di lavoro più sicuri, confortevoli e sostenibili, riducendo l'incidenza dei disturbi muscolo-scheletrici e favorendo il benessere dei lavoratori. Tuttavia, è fondamentale continuare a lavorare su di essi per garantirne un'efficacia maggiore.



## References

- [1] *16ES100=2 Paexo Shoulder*. <https://ottobockexoskeletons.com>. Accessed: 18 September 2024.
- [2] Brunner A. et al. “Effect of a Passive Shoulder Support Exoskeleton on Fatigue During Working with Arms over Shoulder Level”. In: (2023).
- [3] G. Ambrosi et al. *Anatomia dell'uomo*. Edi-ermes, 2008.
- [4] *Appunti del corso "Laboratorio di ingegneria biomedica": proprietà e modalità di acquisizione dei principali biosegnali*. <https://learn.univpm.it>. Accessed: 22 September 2024.
- [5] BTS Bioengineering. *Manuale Utente*. 2023.
- [6] M. Bland. *Statistica medica*. Maggioli Editore, 2019.
- [7] Romero D. and Stahre J. “Towards the resilient operator 5.0: The future of work in smart resilient manufacturing systems”. In: (2021).
- [8] *Empatica: Medical devices, AI and algorithms for remote patient monitoring*. <https://www.empatica.com>. Accessed: 16 September 2024.
- [9] Collautti Enrico. “Esoscheletri per il cammino controllati da BCI: una revisione sistematica”. Università degli studi di Padova, 2022-2023.
- [10] A. Ferretti F. Postacchini E. Ippolito. *Ortopedia e Traumatologia*. Antonio Delfino Editore, 2022.
- [11] Sonzogni Federico. “Esoscheletro e corpo libero: differenze fra attivazione muscolare e forza espresse durante un gesto specifico”. Università degli studi di Padova, 2023-2024.
- [12] Pietrafesa Francesco. “Assemblaggio di un prototipo di esoscheletro ad uso industriale e progettazione di un simulatore della persona per testare dispositivi esoscheletrici industriali attivi per sostegno busto”. Politecnico di Torino, 2019-2020.
- [13] M.D. Frank H. Netter. *Atlante di anatomia umana*. edra, 2019.
- [14] Ashta G. et al. “Passive Exoskeletons to Enhance Workforce Sustainability: Literature Review and Future Research Agenda”. In: (2023).
- [15] Gallina Gianluca. “Influenza di un esoscheletro passivo nella forza muscolare in lavoratori che svolgono movimentazione manuale dei carichi”. Università degli Studi di Padova, 2022-2023.
- [16] Spagnuolo Giulio. “Esoscheletro per la riabilitazione dell'arto superiore cinematicamente ottimizzato per i movimenti di spalla e gomito”. Politecnico di Milano, 2012-2013.
- [17] N. Hoffmann, G. Prokop, and R. Weidner. “Methodologies for evaluating exoskeletons with industrial applications”. In: (2020).
- [18] Kok J. et al. “Work-related MSDs: Prevalence, costs and demographics in the EU”. In: (2019).



- [19] G. Legnani and G. Palmieri. *Fondamenti di meccanica e biomeccanica del movimento*. CittàStudi Edizioni, 2016.
- [20] Di Coste Marco. “Progettazione di componenti di attuazione per un esoscheletro attivo industriale di supporto per la zona lombare”. Politecnico di Torino, 2018-2019.
- [21] *MATLAB*. <https://it.wikipedia.org>. Accessed: 18 September 2024.
- [22] P. Maurice et al. “Objective and Subjective Effects of a Passive Exoskeleton on Overhead Work”. In: (2018).
- [23] *Paexo Shoulder per il sollievo della spalla*. <https://orthexo.de>. Accessed: 18 September 2024.
- [24] *Periartrite alla spalla: Cos'è, Cause, Sintomi e Cura*. <https://www.my-personaltrainer.it>. Accessed: 12 September 2024.
- [25] Li-Baboud Y. S. et al. “Gli esoscheletri industriali come tecnologia ponte per la tutela del lavoratore nell’industria 4.0”. In: (2023).
- [26] De Bock S. et al. “Passive shoulder exoskeleton support partially mitigates fatigue-induced effects in overhead work”. In: (2023).
- [27] R. M. van Sluijs et al. “A method to quantify the reduction of back and hip muscle fatigue of lift-support exoskeletons”. In: (2019).
- [28] *The Xsens motion capture suits*. <https://www.movella.com>. Accessed: 16 September 2024.
- [29] Davide Zuccon. “Valutazione della percezione di comfort e performance durante l’esecuzione di stacchi isometrici con l’utilizzo di un esoscheletro passivo in lavoratori esposti a movimentazione manuale dei carichi”. Università degli Studi di Padova, 2022-2023.