



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Biomedica

**Ergonomia di processo e utilizzo di esoscheletri passivi in ambienti
lavorativi**

**Ergonomic processes and use of passive exoskeletons in work
environments**

Relatore:

Prof. Giacomo Palmieri

Tesi di Laurea di:

Ylenia Bellagamba

A.A. 2019 / 2020

INDICE

INTRODUZIONE	3
1. ERGONOMIA DI PROCESSO	5
1.1. che cosa è l'ergonomia	5
1.2. prodotto ergonomico	6
1.3. progettazione ergonomica	8
1.4. progetto intERA	9
2. ESOSCHELETRI	13
2.1 utilizzo di esoscheletri	13
2.2. classificazione e qualificazione	14
2.3. componenti funzionali	15
2.4. rischi e benefici	17
3 APPLICAZIONI DI ESOSCHELETRI	20
3.1 applicazioni industriali	20
3.2 applicazioni in campo medico	24
3.3 applicazioni in campo edile	28
4 MATE COMAU	33
4.1 finalità e benefici	33
4.2 design	35
4.3 MATE E MATE-XT	37
CONCLUSIONE	39
SITOGRAFIA	43
RINGRAZIAMENTI	46

INTRODUZIONE

Nel seguente lavoro di tesi si affronta la tutela delle malattie da lavoro correlate con le diverse modalità di svolgimento delle attività.

Si è registrato, infatti, un numero sempre crescente di patologie dell'apparato muscolo scheletrico e questo ha portato all'attenzione la conoscenza dell'ergonomia, diventata oggi un elemento essenziale per la valutazione del comfort nei posti di lavoro.

A tal proposito viene analizzato l'utilizzo di esoscheletri che forniscono un supporto reale in tutte le professionalità, dal medico all'operaio in ambiente industriale.

Le motivazioni che mi hanno spinto ad analizzare tale tema sono l'importanza di garantire ambienti lavorativi sicuri e di prevenire quindi l'insorgenza di malattie dovute ad azioni ripetitive e prolungate nel tempo.

La soluzione proposta è l'utilizzo di esoscheletri che consentono di ridurre l'affaticamento in modo tale da migliorare la salute, il comfort e le prestazioni degli utenti.

Inoltre, un altro aspetto è ridare la speranza ad individui con lesione midollare o patologie del sistema nervoso poiché tali dispositivi rappresentano un supporto fondamentale nella neuroriabilitazione in quanto consentono di migliorare ed incentivare il cammino naturale.

L'obiettivo di questo elaborato è evidenziare l'importanza di soluzioni ergonomicamente corrette per i diversi ambienti lavorativi, non solo per tutelare l'Uomo ma anche per offrire un vantaggio dal punto di vista economico.

La tesi è articolata in quattro capitoli: nel primo viene fornita una definizione di ergonomia di processo, finalizzata a promuovere il benessere dell'Uomo in ambiente lavorativo e di prodotto ergonomico, centrato sull'utente e soddisfacente nell'utilizzo.

Inoltre sono presentati i metodi di valutazione dei posti di lavoro e gli aspetti fondamentali di una progettazione ergonomica, facendo riferimento ad un particolare metodo sviluppato dal progetto intERA che prende in considerazione diversi fattori di

rischio e consente di determinare le corrette condizioni ergonomiche grazie all'ausilio di un pacchetto software costituito da quattro differenti moduli che fungono da linee guida. Nel secondo capitolo è analizzato l'utilizzo di dispositivi esoscheletrici per supportare l'attività umana, vengono classificati in dispositivi attivi e passivi e sono presentati tutti i componenti funzionali.

Oltre a ciò, sono presi in considerazione i potenziali rischi nell'adozione di questi sistemi, dovuti al loro design e funzionalità e i benefici per quanto riguarda la capacità di rendere il lavoro più efficiente e proteggere la struttura muscolare e ossea da azioni ripetute e faticose.

Il terzo capitolo riguarda l'applicazione di esoscheletri in tre diversi ambiti, il primo è quello industriale in cui viene descritto un particolare esoscheletro, il Chairless chair, un dispositivo che permette di ridurre l'affaticamento mentre si è accovacciati o in piedi nella stessa posizione per un periodo di tempo prolungato poiché è costituito da due supporti identici che vengono legati alle gambe e consentono all'utente di assumere una posizione seduta in qualsiasi istante, senza una vera sedia visibile.

Il secondo è il campo medico, nel quale vengono evidenziati i vantaggi dell'ausilio di tali sistemi, soprattutto per la deambulazione.

Sono descritti, inoltre, due dispositivi esoscheletrici indossabili e leggeri, Ekso e Phoenix, che ridanno la possibilità di stare in piedi e camminare con le stampelle o un deambulatore ad individui che hanno deficit motori agli arti inferiori.

Il terzo ambito è quello edile in cui è proposta la soluzione di un esoscheletro adattivo che funge da protesi per gli edifici affinché sia garantita l'efficienza strutturale sia in campo statico che in caso di azioni sismiche agenti e sono rappresentati i numerosi vantaggi legati all'impiego di tale metodo.

Infine, nel quarto capitolo viene descritto l'esoscheletro MATE, un sistema altamente ergonomico, oggi molto diffuso che consente una riduzione del rischio di sovraccarico biomeccanico degli arti superiori dei lavoratori e in particolare, nei movimenti di flessione-estensione delle braccia.

Inoltre, sono riportate le finalità e i benefici che derivano dall'utilizzo di tale dispositivo e viene descritto il suo design.

Per concludere viene presentata la sua ultima versione, MATE-XT, elaborata nell'arco di due anni, seguendo consigli e feedback trasmessi dalle aziende e può essere utilizzato in ambiente industriale, non industriale e all'aperto.

1 ERGONOMIA DI PROCESSO

1.1 Che cosa è l'ergonomia

L'ergonomia riguarda la progettazione di sistemi, macchinari, compiti tecnici, utensili e tutto ciò che è volto a migliorare la sicurezza, il comfort, la salute e le prestazioni degli operatori.

Il punto centrale dell'interesse ergonomico nella progettazione degli ambienti lavorativi è infatti l'Uomo.¹

Tutto viene realizzato in funzione delle sue capacità fisiche e psichiche, delle esigenze e dei bisogni, tenendo conto dei suoi limiti che si differenziano in relazione alla tipologia di attività, al contesto specifico in cui si opera e agli obiettivi prefissati.

¹ https://www.frareg.com/cms/wp-content/uploads/INAIL_glossario_ergonomia.pdf pp.9-10

L'ergonomia coinvolge:

- La posizione che viene assunta dal lavoratore (seduta, eretta...), dunque la postura e il movimento corporeo con le specifiche attività da svolgere (sollevamenti, trazioni...)
- I fattori ambientali che riguardano ad esempio il tipo di illuminazione, il clima, l'eventuale presenza di rumore di sottofondo o di vibrazioni
- Le operazioni e le informazioni che possono essere ottenute sia visivamente che attraverso altri sensi
- L'organizzazione del lavoro e in particolare l'assegnazione di compiti appropriati, non ripetitivi e monotoni²

L'ergonomia fa riferimento a diversi settori delle scienze umane e della tecnologia, dalla biomeccanica e ingegneria meccanica alla psicologia e tecnologia dei mezzi di comunicazione.

Ad oggi l'interesse dell'ergonomia è focalizzato sul perseguimento del benessere dell'uomo attraverso la progettazione di tecniche e metodologie d'indagine efficaci.³

1.2 Prodotto ergonomico

Un prodotto ergonomico è centrato sull'utente, amichevole nell'interazione, sicuro, facile e soddisfacente nell'utilizzo.⁴

Si contraddistingue, infatti, per il suo elevato grado di usabilità.

²https://www.frareg.com/cms/wp-content/uploads/INAIL_glossario_ergonomia.pdf pp.9-10

³ Ibid

⁴ Ivi, p.11

Con questo termine si intende la facilità con cui si impara a lavorare con il sistema, l'efficienza di un'attività, determinata dal massimo livello di produttività possibile e la facilità con cui l'utente riesce a memorizzare le varie informazioni.

Un altro aspetto riguarda, inoltre, il minimo numero di errori compiuti dall'utente in interazione con il sistema e la soddisfazione d'uso degli operatori.

L'usabilità di un prodotto viene misurata in relazione a certi utenti e a certi compiti.

E' necessario sottolineare infatti che ad uno stesso prodotto è associato un grado di usabilità differente in relazione alle diverse attività richieste e agli utenti che si contraddistinguono, ad esempio, per livello di conoscenza della materia.⁵

Per la progettazione e la valutazione di un sistema è quindi necessario prendere in considerazione la tipologia di persone che lo userà, le loro abilità, il livello culturale, l'età e il grado di "expertise" specifico per il compito in questione, con l'obiettivo di prevedere il livello di difficoltà dei diversi utenti e determinare i limiti accettabili all'interno del sistema stesso.

Come è espresso dalla norma ISO 9241 (ergonomic requirements for office work with visual display terminals) la "qualità ergonomica non è un attributo dell'oggetto, ma è un attributo dell'uso dell'oggetto in un determinato ambiente".⁶

Quest'ultima è quindi influenzata dal contesto o ambiente in cui il prodotto si trova.

Ad esempio uno stesso ventilatore può risultare rumoroso in un ambiente ospedaliero e non udibile in un locale affollato.

Anche la differenza di expertise dei diversi utenti può cambiare il giudizio di usabilità dello stesso oggetto.

Un ricercatore, infatti, può attribuire un elevato grado di usabilità ad un software che potrà, al contrario, risultare assolutamente non utilizzabile per un utente inesperto.⁷

La valutazione ergonomica di un prodotto viene quindi effettuata prendendo in considerazione un oggetto in relazione all'ambiente in cui viene utilizzato.

⁵ https://www.frareg.com/cms/wpcontent/uploads/INAIL_glossario_ergonomia.pdf p.12

⁶ Ibid

⁷ Ibid

1.3. Progettazione ergonomica

L'ergonomia ha sperimentato numerosi criteri e metodi di valutazione volti ad evidenziare le esigenze derivanti dal sistema di interazione tra individuo, artefatti e ambiente.⁸

Negli ultimi anni le industrie hanno dato un'importanza crescente all'approccio ergonomico in quanto permette di evidenziare i desideri e le esigenze degli utenti.

Recentemente, questa disciplina ha introdotto infatti nuovi concetti e principi che forniscono un quadro più ampio della visione di benessere e comfort.⁹

Sono stati elaborati numerosi metodi di valutazione ergonomica che hanno l'obiettivo di misurare in maniera efficace e affidabile i rischi legati allo specifico compito da svolgere, alle caratteristiche dell'ambiente e all'organizzazione delle diverse attività.

E' importante sottolineare inoltre, che tali metodi devono rilevare situazioni che aumentano la probabilità di insorgenza di malattie nell'ambiente lavorativo senza standardizzare le diverse attività.

Adottando questo approccio gli utenti che si occupano della valutazione della sicurezza sono supportati nella definizione di miglioramenti tecnici e organizzativi.¹⁰

Uno di questi metodi è stato sviluppato dal progetto intERA che prende in considerazione numerosi fattori di rischio che permettono di effettuare una valutazione ergonomica in diversi contesti e mansioni lavorative.¹¹

⁸https://books.google.it/books?hl=it&lr=&id=xFXODQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA32&dq=protocolli+per+la+valutazione+di+un+processo+ergonomico&ots=1ZbRBC1e82&sig=p9Wf7H5DknArW9vCRunqEn9x_kU&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false , Giuseppe di Bucchianico, p.32, parte 3

⁹ Ibid

¹⁰ <https://www.iioehy.it/index.php/IJOEHY/article/view/273>, pubblicazione 3/6/2018

¹¹ <http://progettointera.it/fattori-e-macro-indicatori-di-rischio-in-intera/>, 1 luglio 2016

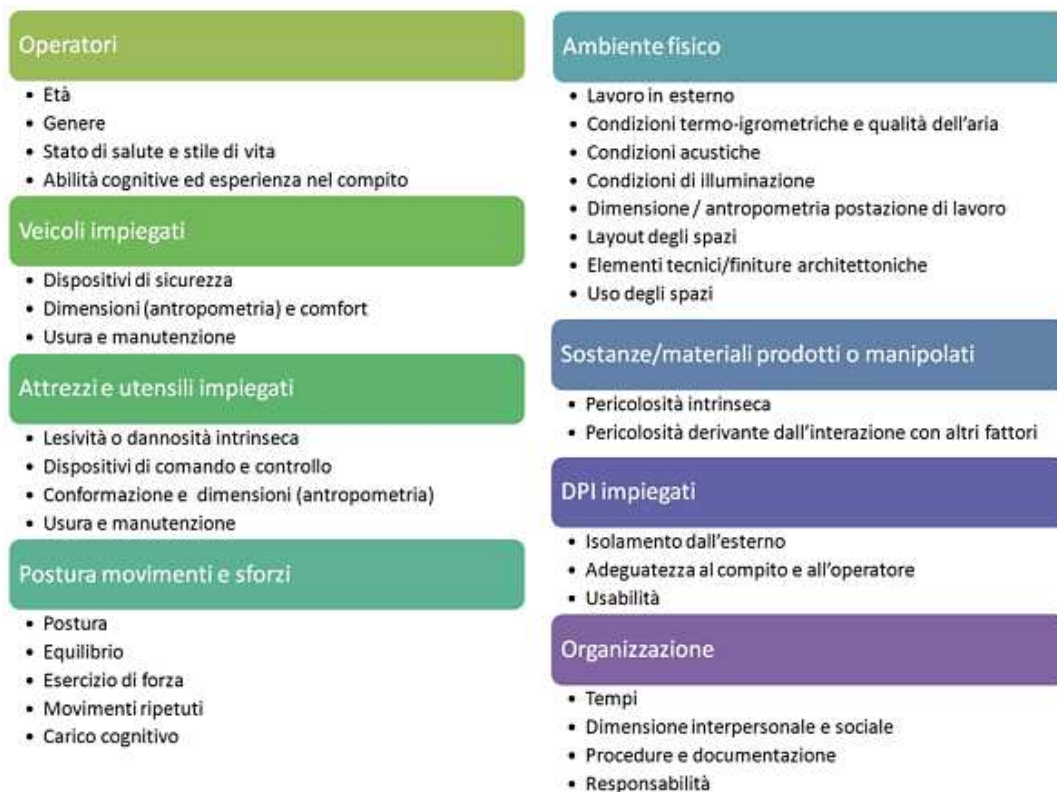


FIGURA1– Fattori e macro indicatori di rischio in intERA¹²

1.4. Progetto intERA

Il progetto IntERA (Integrazione dei software Ergonomic Risk Assessment) è nato dalla collaborazione scientifica fra la Contarp Campania (ufficio territoriale relativo alla struttura organizzativa dell'INAIL, Istituto Nazionale per l'assicurazione contro gli

¹² FIGURA1- <http://progettointera.it/fattori-e-macro-indicatori-di-rischio-in-intera/>, 1 luglio 2016

infortuni sul lavoro) e il Laboratorio di Ergonomia Applicata e Sperimentale dell'Università Federico II di Napoli.¹³

L'obiettivo è la realizzazione di una suite di cinque software finalizzati ad una valutazione ergonomica delle attività lavorative (ERA).

Tra la richiesta di misure generali di tutela, il progetto promuove un testo unico basato sul "rispetto dei principi ergonomici nell'organizzazione del lavoro, nella concezione dei posti di lavoro, nella scelta delle attrezzature e nella definizione dei metodi di lavoro e produzione, in particolare al fine di ridurre gli effetti sulla salute del lavoro monotono e di quello ripetitivo" (art 15 d.lgs. 81/08).¹⁴

Tale progetto si propone quindi di costruire e rendere disponibili gratuitamente delle linee guida a tutti gli operatori che si occupano della valutazione della sicurezza e della considerazione globale dei rischi ergonomici, così da poter individuare le criticità e proporre degli interventi che mirano alla protezione della salute e alla promozione del comfort dei lavoratori.¹⁵

In particolare, vengono presi in considerazione gli ambienti di lavoro dei principali settori della Campania:¹⁶

- Industria alimentare
- confezione di articoli di abbigliamento e pelletteria
- produzione agricola
- grande distribuzione organizzata
- attività lavorative di ufficio

Dopo aver individuato le aziende presso le quali condurre l'osservazione, sono state determinate le caratteristiche dell'ambiente, della postazione e delle attrezzature che determinano le condizioni ergonomiche.

¹³ ER LA [https://www.researchgate.net/profile/Raffaele_Dangelo2/publication/274637932_INTERA - STRUMENTI PVALUTAZIONE ERGONOMICA DEGLI AMBIENTI DI LAVORO/li, R. D'ANGELO*, P.S. D'ONOFRIO*, E. ATTAIANESE**, G. DUCA**p.241](https://www.researchgate.net/profile/Raffaele_Dangelo2/publication/274637932_INTERA_-_STRUMENTI_PVALUTAZIONE_ERGONOMICA_DEGLI_AMBIENTI_DI_LAVORO/li,R.D'ANGELO*,P.S.D'ONOFRIO*,E.ATTAIANESE**,G.DUCA**p.241)

¹⁴ Ibid

¹⁵ Ivi, p.242

¹⁶ Ibid

Da tali caratteristiche sono stati elaborati gli indicatori e le regole che costituiscono i protocolli di valutazione del rischio ergonomico, sulla base dei quali è stato sviluppato il modello concettuale del software.¹⁷

Il pacchetto software rappresenta una vera e propria guida in quanto è caratterizzato da una sequenza di schermate, con domande a risposta chiusa o campi liberi da compilare.

Il set di dati fornito dall'utente viene poi utilizzato dal programma ERA per valutare le condizioni ergonomiche.

Nello specifico i software guidano gli operatori nella descrizione delle caratteristiche generali dell'ambiente architettonico in cui il compito si svolge, delle caratteristiche generali dell'impianto di produzione utilizzato e delle caratteristiche organizzative generali, grazie alla compilazione di un modulo di descrizione generale dell'ambiente e delle postazioni di lavoro.¹⁸

Un secondo modulo, invece, riguarda l'analisi ergonomica delle attività attraverso una task analysis, una tecnica di analisi che permette di scomporre in compiti elementari le diverse attività e descriverle poi nel dettaglio.¹⁹

Questa tecnica ha lo scopo di determinare le modalità di svolgimento delle azioni compiute dai lavoratori e i possibili punti critici nell'utilizzo di impianti, attrezzature e spazi operativi.

I dati inseriti vengono poi elaborati secondo le regole relative a ciascun comparto produttivo in un terzo modulo.

Infine il software è dotato di un quarto e ultimo modulo che permette di guidare gli utenti nell'adozione di ulteriori metodi specifici di valutazione del rischio come la movimentazione manuale dei carichi, i movimenti ripetitivi e la spinta e traino dei carichi.²⁰

¹⁷ ER LA [https://www.researchgate.net/profile/Raffaele_Dangelo2/publication/274637932_INTERA - STRUMENTI PVALUTAZIONE ERGONOMICA DEGLI AMBIENTI DI LAVORO/li, R. D'ANGELO*, P.S. D'ONOFRIO*, E. ATTAIANESE**, G. DUCA**](https://www.researchgate.net/profile/Raffaele_Dangelo2/publication/274637932_INTERA_-_STRUMENTI_PVALUTAZIONE_ERGONOMICA_DEGLI_AMBIENTI_DI_LAVORO/li,R.D'ANGELO*,P.S.D'ONOFRIO*,E.ATTAIANESE**,G.DUCA**) p.243

¹⁸ Ivi, p.244

¹⁹ <http://progettointera.it/la-task-analysis/>

²⁰ ER LA [https://www.researchgate.net/profile/Raffaele_Dangelo2/publication/274637932_INTERA - STRUMENTI PVALUTAZIONE ERGONOMICA DEGLI AMBIENTI DI LAVORO/li, R. D'ANGELO*, P.S. D'ONOFRIO*, E. ATTAIANESE**, G. DUCA**](https://www.researchgate.net/profile/Raffaele_Dangelo2/publication/274637932_INTERA_-_STRUMENTI_PVALUTAZIONE_ERGONOMICA_DEGLI_AMBIENTI_DI_LAVORO/li,R.D'ANGELO*,P.S.D'ONOFRIO*,E.ATTAIANESE**,G.DUCA**) p.244

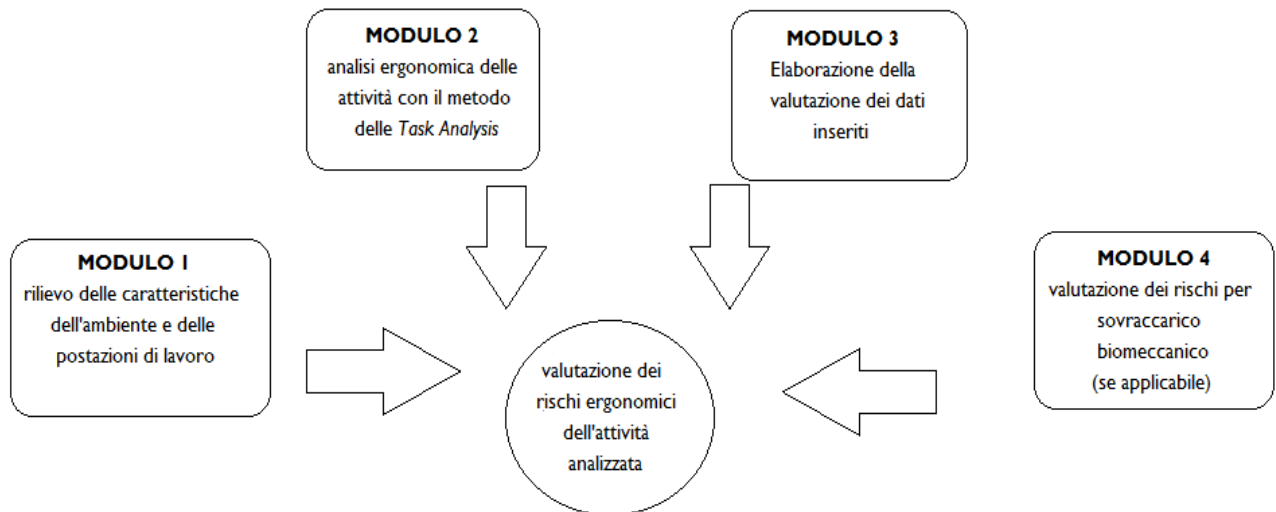


FIGURA2- Moduli funzionali che comporranno i 5 software ERA da realizzare²¹

Il software oltre ad individuare le criticità, permette di indirizzare gli operatori nella scelta di interventi di miglioramento e verificarne preventivamente la validità simulando le nuove condizioni nell'inserimento dei dati.²²

²¹ER_LA https://www.researchgate.net/profile/Raffaele_Dangelo2/publication/274637932_INTERA_-_STRUMENTI_PVALUTAZIONE_ERGONOMICA_DEGLI_AMBIENTI_DI_LAVORO/li,R.D'ANGELO*, P.S. D'ONOFRIO*, E. ATTAIANESE**, G. DUCA** p.244

²²FIGURA2-Ibid

2 ESOSCHELETRI

2.1 Utilizzo esoscheletri

L'utilizzo di dispositivi esoscheletrici per supportare l'attività umana è un argomento che ha suscitato grande attenzione già da tempo, in tutto il mondo.

La più antica rappresentazione di un esoscheletro risale infatti al 1830 per opera dell'artista inglese Robert Seymour, pubblicata da Thomas McLean dal titolo *Locomotion: Walking by steam, Riding by steam, Flying by steam*.

In questa immagine è raffigurato l'uso del motore a vapore come attuttore per le gambe ed è divenuta un'icona nella riabilitazione robotizzata, ripresa poi negli anni successivi per studi scientifici.²³

La fusione della mecatronica con l'Information and Communication Technology ha permesso l'introduzione di questi sistemi mecatronici, sviluppati nei centri accademici e di ricerca.²⁴

Questi sistemi sono stati introdotti in diversi settori, da quelli industriali per sostenere i lavoratori²⁵ in attività ripetitive e con carichi eccessivi, al campo medico.

Grazie a programmi mirati di riabilitazione questi dispositivi sono in grado di dare un grande contributo alla riabilitazione poiché possiedono delle specifiche funzionalità che permettono il cammino assistito e il recupero del controllo del movimento.

²³ https://www.iss.it/documents/20126/45616/18_10_web.pdf/5db74607-7623-433a-3fbb-db5b5b586819?t=1581099384560#page=24 p.3

²⁴ Ibid

²⁵ <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580520310736>

Nel settore dell'edilizia è stato poi diffuso l'uso di sistemi a esoscheletro adattivo per la resilienza dell'ambiente costruito.

E' emerso inoltre che un singolo esoscheletro può essere sfruttato in diversi campi, nonostante sia stato progettato per una specifica destinazione d'uso.²⁶

Un esoscheletro è una struttura esterna costituita da collegamenti e giunture che corrispondono a parti del corpo.

Per il movimento degli arti sono dotati di una sorgente di alimentazione che fornisce l'energia necessaria.

Questi dispositivi possono essere considerati robot indossabili, disegnati per le forme e funzioni del corpo umano e comportano numerosi benefici per la salute dei pazienti.²⁷

Recentemente grazie anche ai costi affrontabili sia di acquisto che di affitto, essi rappresentano anche un'importante risorsa per i cittadini che hanno la possibilità di affrontare processi di riabilitazione con continuità, mediante la modalità domiciliare.

2.2 Classificazione e qualificazione

Gli esoscheletri possono essere classificati come sistemi attivi o passivi.

Gli esoscheletri attivi sono dotati di attuatori, componenti meccanici costituiti da motori elettrici che possono essere azionati anche idraulicamente o pneumaticamente.

Essi sono in grado di supportare i movimenti umani e aumentano le prestazioni di un lavoratore fornendo un'ulteriore forza.

Gli esoscheletri passivi, invece, sfruttano le forze di ripristino di ammortizzatori, molle o altri materiali per sostenere il movimento dell'uomo.

²⁶ https://www.iss.it/documents/20126/45616/18_10_web.pdf/5db74607-7623-433a-3fbb-db5b5b586819?t=1581099384560#page=24 p.3

²⁷ Ivi, p.7

Le prestazioni dell'utente dipendono dalla sua capacità di mantenere delle posizioni estenuanti per un periodo di tempo prolungato e questi dispositivi permettono di ridistribuire le forze per proteggere delle specifiche regioni del corpo.

L'energia immagazzinata da questa tipologia di esoscheletri è generata esclusivamente dal movimento dell'utente.

Per poter qualificare un esoscheletro occorre prendere in considerazione il design e l'uso previsto.

Tale dispositivo può essere definito come un aiuto tecnico, regolato dalla Direttiva Macchine dell'Unione Europea del 2006 n. 42.²⁸

Se un esoscheletro è certificato come DPI può essere utilizzato a scopo preventivo per evitare lesioni dovute al lavoro o da sforzo eccessivo.²⁹

2.3 Componenti funzionali

Un problema fondamentale degli esoscheletri è il pilotaggio.

Sono state proposte diverse soluzioni basate ad esempio su:

- joystick
- sensori che utilizzano la comunicazione alternativa e aumentata
- sensori che rilevano l'inclinazione in avanti del tronco
- sensori per elettromiografia che rilevano l'attivazione muscolare³⁰

²⁸ <http://www.bollettinoadapt.it/potenzialita-e-limiti-delluso-degli-esoscheletri-nel-recente-rapporto-eu-osh/?pdf=91738> p.3

²⁹ Ibid

³⁰ https://www.iss.it/documents/20126/45616/18_10_web.pdf/5db74607-7623-433a-3fbb-db5b5b586819?t=1581099384560#page=24 p.18

Dal punto di vista funzionale possono essere individuati nell'architettura diversi componenti.

La struttura è realizzata da materiali leggeri e deve essere in grado di sostenere il peso dell'esoscheletro, dei suoi componenti e il peso del corpo di colui che lo indossa, in modo sicuro, senza alcun rischio.

La struttura è costituita inoltre da una serie di articolazioni che corrispondono alle articolazioni del corpo.

Un altro componente sono le batterie per alimentare l'esoscheletro.

Devono essere leggere e di dimensioni ridotte per evitare un eccessivo ingombro e caratterizzate da tempi brevi di ricarica.

Un altro aspetto fondamentale è inoltre la possibilità di essere sostituite facilmente quando necessario.³¹

Gli esoscheletri sono poi dotati di sensori in grado di raccogliere informazioni su come l'utilizzatore vuole muoversi.

Possono essere adottate diverse tipologie di sensori.

Si distinguono quelli inerziali come gli accelerometri e i sensori di velocità angolare che permettono di interpretare le intenzioni di moto, quelli manuali come i joystick e quelli basati sul prelevamento di segnali bioelettrici.

In alcuni casi sono anche utilizzati dei telecomandi direttamente integrati in uno smartphone per impostare dei programmi di moto.³²

Le diverse soluzioni per il pilotaggio possono essere combinate e le informazioni raccolte vengono inviate ad un computer affinché possano essere analizzate.

Questi dispositivi sono dotati anche da un regolatore che rappresenta il cervello dell'esoscheletro.

E' un computer di tipo wearable che grazie alle informazioni raccolte dai sensori è in grado di pilotare gli attuatori permettendo all'utente di eseguire diverse azioni come salire o scendere le scale, alzarsi e camminare.

Infine sono presenti gli attuatori che costituiscono i muscoli dell'esoscheletro.

³¹ https://www.iss.it/documents/20126/45616/18_10_web.pdf/5db74607-7623-433a-3fbb-db5b5b586819?t=1581099384560#page=24 p.18

³² Ivi, p.19

Essi sono realizzati con motori elettrici o idraulici e sfruttano l'energia delle batterie e le informazioni inviate dal computer per muovere l'esoscheletro.³³

2.4 Rischi e benefici

I potenziali rischi sull'utilizzo di esoscheletri sono molteplici e sono dovuti al loro design e alla loro funzionalità.

A causa della costruzione del peso stesso del dispositivo, essi possono infatti aumentare il rischio di lesioni in caso di scivolamento o in un episodio infortunistico di caduta.

Negli ambienti lavorativi occorre inoltre prendere in considerazione anche possibili collisioni tra un esoscheletro e le attrezzature di lavoro.

A questo proposito sono state eseguite delle simulazioni al computer al fine di studiare le applicazioni pratiche degli esoscheletri in ambienti lavorativi.³⁴

E' importante anche valutare possibili situazioni di emergenza durante le quali l'utilizzatore deve essere in grado di togliere l'esoscheletro con rapidità.

Nelle aree in cui il dispositivo è attaccato al corpo potrebbero verificarsi dei punti di pressione, causando disagio nel tempo.

Si potrebbe riscontrare poi una riduzione del flusso sanguigno come conseguenza della pressione esterna esercitata da cinghie o cinture sui vasi sanguigni.

E' possibile inoltre che l'utilizzatore a causa dell'attrito o di reazioni allergiche abbia un'irritazione della pelle.

³³ https://www.iss.it/documents/20126/45616/18_10_web.pdf/5db74607-7623-433a-3fbb-db5b5b586819?t=1581099384560#page=24 p.19

³⁴ <http://www.bollettinoadapt.it/potenzialita-e-limiti-delluso-degli-esoscheletri-nel-recente-rapporto-eu-osa/?pdf=91738> p.4

Alcuni studi hanno dimostrato che gli esoscheletri duri inizialmente giudicati positivamente dagli utenti, possano poi comportare disagio.³⁵

I lavoratori possono inoltre essere limitati nella loro naturale libertà di movimento.

Un esoscheletro pone infatti dei vincoli cinematici agli arti collegati ad esso.

Ad esempio il braccio umano ha sette gradi di libertà: abduzione/adduzione e flessione/estensione della spalla, rotazione del braccio, flessione/estensione del gomito, rotazione dell'avambraccio, deviazione ulnare/radiale e la flessione/estensione del polso.³⁶

L'obiettivo è non compromettere il movimento naturale dell'arto e lo workspace dello stesso.

Deve inoltre essere dotato di capacità di coppia tali da soddisfare o migliorare le capacità umane.

Il design meccanico dei sistemi esoscheletrici dipende dalla complessità con cui vengono realizzati i giunti articolari e i materiali utilizzati.³⁷

Lo scopo è di ottimizzare le caratteristiche come l'indossabilità, la stabilità e l'ampiezza della banda di controllo anche se per ottenere tali ottimizzazioni, spesso occorre sacrificarne altre come lo workspace.

Workspace più ampi infatti vengono ottenuti mediante una maggiore complicità della struttura, il che comporta un aumento del peso e delle dimensioni influenzando inevitabilmente sulla mobilità dell'esoscheletro stesso.³⁸

E' importante considerare inoltre la destinazione d'uso di un determinato dispositivo, in quanto questo va ad influenzare la grandezza e la forma del workspace.

Per quanto riguarda i benefici, attualmente ci sono numerosi studi che dimostrano che gli esoscheletri possono ridurre lo stress fisico.³⁹

Quelli applicati in campo lavorativo permettono infatti di sollevare carichi con sforzi e sollecitazioni minori e di svolgere lavori ripetitivi con minor fatica.

³⁵ <http://www.bollettinoadapt.it/potenzialita-e-limiti-delluso-degli-esoscheletri-nel-recente-rapporto-eu-osha/?pdf=91738> p.4

³⁶ <https://core.ac.uk/download/pdf/19204609.pdf> p.17

³⁷ Ibid

³⁸ Ivi, p.18

³⁹ <http://www.bollettinoadapt.it/potenzialita-e-limiti-delluso-degli-esoscheletri-nel-recente-rapporto-eu-osha/?pdf=91738>

Questo rende il lavoro più efficiente e protegge la struttura muscolare e ossea da azioni ripetute e faticose.

I pesi infatti sono distribuiti in modo più equilibrato e questo permette di prevenire infortuni ed eventuali patologie degenerative.

Gli esoscheletri potenziano quindi le capacità fisiche seguendo il movimento degli arti e adattandosi per alleggerire il carico.⁴⁰

Oltre alla riduzione dell'affaticamento essi permettono un miglioramento generale della qualità del lavoro e consentono di svolgere le azioni con maggiore precisione e in modo più rapido.

Questi sistemi sono perciò ritenuti molto validi e in grado di apportare un beneficio sociale.

Gli esoscheletri realizzati invece in campo riabilitativo permettono di sostenere i pazienti nel cammino durante percorsi di cura.

Essi infatti consentono di recuperare la posizione eretta e in perfetta simmetria.

Vengono allenati i naturali schemi motori appresi durante il normale sviluppo neuro-motorio e viene contrastato l'instaurarsi di posture sbagliate, difficili da contenere in una classica esercitazione.⁴¹

Questo permette al paziente una corretta ripresa del cammino e una riabilitazione più veloce ed efficace.

Le prestazioni riabilitative sono quindi più intensive e l'utilizzo di tali dispositivi permette di impostare e gestire alcuni parametri di lavoro al fine di rendere la riabilitazione specifica ed ottimale per ciascun paziente.

Si ha la possibilità di determinare infatti la tipologia dell'esercizio, il livello di assistenza da parte del dispositivo, la traiettoria da seguire, la forza che il paziente deve esercitare e la velocità con cui vengono eseguite le azioni.⁴²

Gli esoscheletri oltre ad essere utilizzati come tutori per il cammino, sono di grande aiuto anche per la riabilitazione dell'arto superiore.

⁴⁰<https://hfitaly.com/esoscheletrilavoro/#:~:text=Vi%20sono%20molti%20benefici%20nell,precisone%20in%20modo%20pi%C3%B9%20veloce.>

⁴¹ <http://www.galm.it/luso-degli-esoscheletri-in-riabilitazione/>

⁴² <https://www.riabilitazioneinfo.it/fisioterapia-e-robotica-la-robotica-un-innovativo-strumento-al-servizio-del-fisioterapista-e-dei-suoi-interventi-riabilitativi-di-anna-boido-dottore-in-fisioterapia/>

Tali dispositivi prevedono quindi l'impostazione di esercizi per la mobilizzazione articolare.

I risultati positivi si registrano non solo a livello fisico, ma anche a livello psicologico.⁴³

3 APPLICAZIONI DI ESOSCHELETRI

3.1 Applicazioni industriali

L'applicazione di esoscheletri per l'industria offre numerosi vantaggi come la riduzione di infortuni sul lavoro con un conseguente risparmio delle spese mediche e una diminuzione di congedi per malattia.

Si ha inoltre una riduzione dell'affaticamento dei lavoratori che comporta un aumento della produttività, della qualità del lavoro e una migliore resistenza fisica.

Un particolare esoscheletro utilizzato nei posti di lavoro è il *Chairless chair*, un dispositivo leggero che viene indossato sopra i pantaloni e può irrigidirsi e bloccarsi.

E' stato realizzato con lo scopo di ridurre l'affaticamento mentre si è accovacciati o in piedi nella stessa posizione per un periodo di tempo prolungato e rappresenta un supporto esoscheletrico a base idraulica che consente agli utenti di camminare e muoversi con una certa velocità mentre lavorano.⁴⁴

⁴³ <https://www.doveecomemicro.it/enciclopedia/anatomia/robotica>

⁴⁴ <https://www.automationtomorrow.com/quali-applicazioni-industriali-per-gli-esoscheletri/>

Chairless chair è un dispositivo ergonomico e meccanico, progettato in base alla forma del corpo umano con segmenti e articolazioni che corrispondono a quelli della persona che deve indossarlo e potrebbe non adattarsi correttamente ad altri utenti.

Attraverso un ammortizzatore collegato al telaio scarica il peso corporeo a terra e consente quindi di riposare i muscoli delle gambe.⁴⁵

Tale dispositivo è infatti costituito da coppie cinematiche che permettono di effettuare soste tra movimenti continui in qualsiasi posizione ed è quindi in grado di ridurre il rischio di disturbi muscoloscheletrici fisici tra i lavoratori.

Esso si estende dall'anca alla parte posteriore dei piedi ed è costituito da due supporti identici ognuno dei quali viene legato ad una gamba dell'utente che, piegando le ginocchia, attiva l'ammortizzatore che sostiene il peso e permette di assumere una posizione seduta in qualsiasi istante, senza una vera sedia visibile.

E' dotato poi di una singola batteria di 6V che garantisce il funzionamento per circa 24 ore e di un telaio in alluminio e fibra di carbonio che mantengono il peso complessivo a meno di 2 kg, in modo da non appesantire chi lo indossa.⁴⁶

Ogni arto robotico può essere controllato o tramite un interruttore elettrico o tramite un sistema di controllo auto-assistito.⁴⁷

Inoltre questa sedia esoscheletrica non tocca mai il suolo grazie ad una cintura che la fissa ai fianchi e a delle cinghie che avvolgono ciascuna coscia, il che la rende più facile da indossare.

Nonostante ciò, esiste anche una versione alternativa che tocca il suolo solo quando si trova in una posizione stazionaria.

Questo dispositivo quindi si adatta alla parte inferiore dell'utente come una parte esterna del corpo stesso su cui agiscono le forze e qualsiasi errore di progettazione causa un'inefficienza del prodotto, perciò è necessario analizzare con attenzione le forze fin dalle prime fasi iniziali.⁴⁸

⁴⁵ [file:///C:/Downloads/RamachandranCCESFairReport2018%20\(1\).pdf](file:///C:/Downloads/RamachandranCCESFairReport2018%20(1).pdf) p.5

⁴⁶ <https://www.ripublication.com/ijtam17/ijtamv12n4>

⁴⁷ <https://webthesis.biblio.polito.it/9385/1/tesi.pdf> p.25

⁴⁸ https://www.ripublication.com/ijtam17/ijtamv12n4_03.pdf p.1

Il miglior modo per poter prevedere queste forze nella prefabbricazione è quello di effettuare un'analisi della struttura con l'aiuto di un software che consente di stimare le sollecitazioni indotte, uno dei criteri più importanti per la valutazione del modello.⁴⁹ Questo sistema è una struttura cinematica che secondo i parametri di progettazione può sostenere fino a 100 kg di peso corporeo.

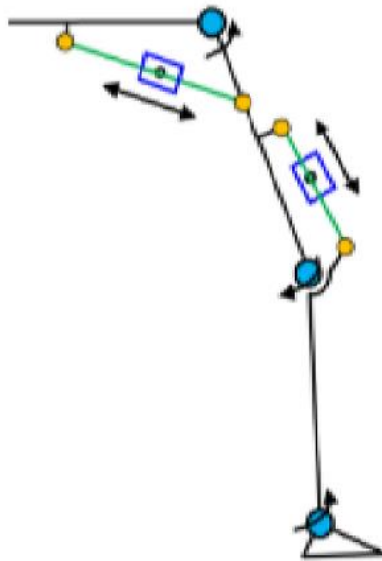


FIGURA3- Struttura cinematica Chairless chair⁵⁰

Sono presenti due cilindri idraulici che ricavano la potenza dalla pressione di un fluido che tipicamente è l'olio.

La canna del cilindro è chiusa in un'estremità mentre dall'altra fuoriesce uno stelo che si muove in avanti e indietro poiché è collegato ad un pistone che scorre all'interno della canna stessa.⁵¹

Lo stelo del pistone ha inoltre degli attacchi di montaggio che consentono di collegare il cilindro al resto della struttura.

⁴⁹ https://www.ripublication.com/ijtam17/ijtamv12n4_03. p.1

⁵⁰ FIGURA3- Ivi, p.4

⁵¹ https://ijsret.com/wp-content/uploads/2020/01/IJSRET_V6_issue1_187.pdf p.3

Conforme con l'ergonomia umana, il Chairless chair è costituito da segmenti che rappresentano rispettivamente il femore, la tibia e la fibula che sono sostituite da un unico elemento e il piede.

Infine sono presenti i giunti che collegano i vari segmenti e consentono il movimento.

In particolare, l'articolazione del ginocchio che è molto vulnerabile a lesioni e osteoartrosi, è costituita da un determinato giunto a cerniera che consente la flessione, l'estensione e la rotazione interna ed esterna.⁵²

L'utente ha la possibilità di scegliere il proprio livello di comfort da 45 ° a 90 ° e durante la condizione di carico la massima flessione registrata è pari a 0,2 mm che può essere quindi trascurata.

Anche gli stress registrati sulla struttura sono al di sotto del carico di rottura massimo e questo permette di classificare tale dispositivo come sicuro.⁵³

Il Chairless chair offre quindi numerosi vantaggi in quanto riduce gli sforzi, è facile da utilizzare ed ha un'alta efficienza, ha un'altezza regolabile e non necessita di una manutenzione frequente.⁵⁴

Anche se gli aspetti positivi sono molteplici, il design deve ancora affrontare alcuni problemi che devono essere risolti in futuro con l'obiettivo di realizzare una sedia ergonomica più leggera utilizzando materiali di alta qualità per una maggiore resistenza.⁵⁵

⁵² https://ijsret.com/wp-content/uploads/2020/01/IJSRET_V6_issue1_187.pdf p.3

⁵³ https://www.ripublication.com/ijtam17/ijtamv12n4_03.pdf p.10

⁵⁴ https://ijsret.com/wp-content/uploads/2020/01/IJSRET_V6_issue1_187.pdf p.3

⁵⁵ Ivi, p.4

3.2 Applicazioni in campo medico

In campo medico e in particolare nella neuroriabilitazione, si incontrano molteplici casi che richiedono approcci differenti e non sempre si ottengono gli stessi risultati.

Inoltre, in alcune occasioni, si ha la possibilità di raggiungere l'obiettivo più rapidamente grazie all'ausilio di supporti esterni come gli esoscheletri.

Soprattutto per la deambulazione, e in particolar modo nelle fasi iniziali, in cui spesso è richiesta l'assistenza di due o più persone poiché è necessario molto tempo e sforzo fisico da parte dei fisioterapisti e pazienti, l'utilizzo di questi dispositivi rappresenta un grande vantaggio.

Nonostante la robotica sia inizialmente costosa, fornisce un supporto concreto e permette di aumentare la quantità di pazienti che un fisioterapista può curare, favorendo la sanità anche dal punto di vista economico.

Tali dispositivi consentono poi di monitorare e controllare la velocità, la direzione, l'ampiezza, i modelli di coordinazione articolare e le perturbazioni controllate del movimento, fornire un supporto al peso con il minimo sforzo e offrire il potenziale per test più affidabili e standardizzati.⁵⁶

L'obiettivo è di migliorare ed incentivare il cammino naturale di individui con lesione midollare, o patologie del sistema nervoso.

Grazie all'elevata durata, bassa intensità di lavoro e alta ripetibilità, gli esoscheletri sono diventati infatti strumenti promettenti anche nella riabilitazione in seguito ad un ictus.⁵⁷

Sono classificati in base agli arti che supportano, possono essere per arti superiori, arti inferiori, arti superiori e inferiori e specifiche articolazioni per il supporto della forza muscolare.⁵⁸

L'utilizzo di esoscheletri in un percorso riabilitativo consente anche di personalizzare il trattamento e renderlo specifico per ciascun paziente, dal momento che possono essere

⁵⁶ <https://tesi.supsi.ch/2256/1/Riccardi%20Mattia%20e%20Fuchs%20Daniele.pdf> p.7

⁵⁷ <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0094114X20303633>

⁵⁸ <https://tesi.supsi.ch/2256/1/Riccardi%20Mattia%20e%20Fuchs%20Daniele.pdf> p.7

configurati in modo tale da fornire una quantità di assistenza variabile, in base alle necessità.

In questo modo è possibile massimizzare gli sforzi del paziente e fornire così una sessione terapeutica rigorosa e mirata.⁵⁹

Un esempio di esoscheletro che viene utilizzato oggi nella riabilitazione è *l'esoscheletro Ekso*, nato nel 2005 per aiutare i soldati statunitensi a trasportare carichi e convertito poi nel 2011 per la deambulazione di persone che hanno deficit motori agli arti inferiori.⁶⁰ E' alimentato idraulicamente e consente ai paraplegici di stare in piedi e camminare con le stampelle o un deambulatore.

La camminata si ottiene attraverso 4 motori e 15 sensori che controllano 500 volte al secondo il corretto movimento e rilevano il peso spostato facendo scattare i singoli passi.

Sono presenti motori a batteria che guidano le gambe in sostituzione delle funzioni neuromuscolari e permettono a persone con paralisi, anche totale, di reggersi in piedi.⁶¹

Utilizza poi microprocessori e sensori di forza e movimento per determinare lo stato e le intenzioni dell'utente e fornisce coppie articolari alle anche e alle ginocchia per generare movimento.⁶²

La programmazione avviene attraverso un display accessibile al fisioterapista che assiste sempre il paziente durante le sessioni di riabilitazione robotizzata, il quale grazie all'utilizzo di questi sistemi è in grado di camminare, girare, sedersi, alzarsi e di indossare e togliere il dispositivo da solo.⁶³

Ekso pesa circa 20 kg, ha una velocità massima di 3,2 km / h con una durata della batteria di 6 ore e consente di stare in piedi e camminare in linea retta.

⁵⁹ <https://webthesis.biblio.polito.it/9385/1/tesi.pdf> p.35

⁶⁰ <http://www.fondazionecentripadrepio.it/lesoscheletro-exso-in-dotazione-alla-fondazione-unica-struttura-in-tutto-il-sud-italia/>

⁶¹ Ibid

⁶² http://research.vuse.vanderbilt.edu/cim/research_orthosis.html

⁶³ <https://www.disabili.com/prodotti/articoli-qprodotti/esoscheletro-in-riabilitazione-per-paziente-mieloleso-funziona>



FIGURA4– Esoscheletro Ekso⁶⁴

Un dispositivo simile al precedente è l'*esoscheletro Phoenix* che ridà la possibilità di camminare autonomamente a chi ha problemi di deambulazione a causa di patologie o traumi.⁶⁵

E' un sistema assistivo a due gradi di libertà per gamba che si basa su un 'modulo anca' ed un 'modulo ginocchio', necessari a riprodurre il cammino.

Il 'modulo anca' può essere regolato in base alle esigenze individuali e compensa la paresi totale o parziale dei muscoli flessori dell'anca e dei glutei, causata ad esempio, da traumi al midollo spinale.

Fornisce inoltre assistenza sia in flessione che in estensione senza ostacolare il moto durante ogni movimento e permette di sincronizzare i parametri del passo nel cammino.

Il 'modulo ginocchio' compensa invece la debolezza o paralisi del quadricipite, le lesioni parziali del midollo spinale, la sindrome post-polio e la sclerosi multipla.⁶⁶

E' facilmente indossabile, regolabile sull'utente e risulta essere leggero e quindi permette di muoversi agilmente e di passare dalla posizione seduta alla posizione eretta

⁶⁴ FIGURA4- <https://webthesis.biblio.polito.it/9385/1/tesi.pdf> p.41

⁶⁵ Ivi, p.43

⁶⁶ [https://files.orthomedica.it/webpages/1000/1031/\[STAMPA%20INTERNA\]%20%20Esoscheletro%20Phoenix%20-%20No%20Codifica.pdf](https://files.orthomedica.it/webpages/1000/1031/[STAMPA%20INTERNA]%20%20Esoscheletro%20Phoenix%20-%20No%20Codifica.pdf) p.2

e viceversa, consente, inoltre, di porsi alla guida di veicoli opportunamente adattati alle varie disabilità, in completa autonomia.

Phoenix ha un peso complessivo di circa 12,5 kg distribuiti nei moduli che lo compongono, ha un'autonomia di utilizzo fino ad un massimo di 6 ore ed è munito di un computer in grado di gestire al meglio il movimento coordinato delle articolazioni.

L'utilizzatore può controllare autonomamente le funzioni dell'esoscheletro tramite comandi manuali posti nelle stampelle, realizzate in carbonio e personalizzabili, collegate al sistema tramite wireless.

Infine, si ha la possibilità di regolare ed impostare diverse velocità e lunghezze del passo.⁶⁷

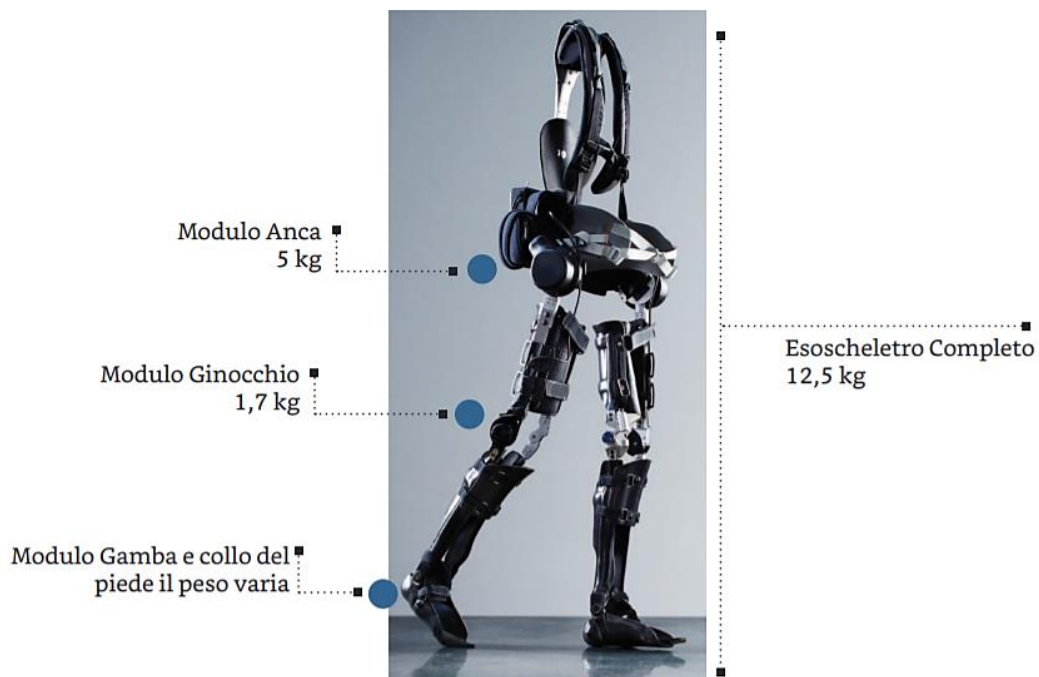


FIGURA5- Esoscheletro Phoenix⁶⁸

⁶⁷ [https://files.orthomedica.it/webpages/1000/1031/\[STAMPA%20INTERNA\]%20-%20Esoscheletro%20Phoenix%20-%20No%20Codifica.pdf](https://files.orthomedica.it/webpages/1000/1031/[STAMPA%20INTERNA]%20-%20Esoscheletro%20Phoenix%20-%20No%20Codifica.pdf) pp.1-2

⁶⁸ FIGURA5- Ibid

Tali dispositivi offrono oggi anche un supporto nello sport, infatti grazie all'utilizzo di un esoscheletro, l'atleta britannica Claire Lomas ha partecipato alla maratona alle Paralimpiadi di Londra 2012.⁶⁹



FIGURA6- Claire Lomas alla maratona di Londra⁷⁰

3.3 Applicazioni in campo edile

L'edilizia realizzata tra gli anni '50 e gli anni '80 presenta diverse problematiche inerenti alla sicurezza strutturale, legate ad una concezione di progettazione ormai superata (“trave forte e pilastro debole”) ed all'impiego di materiali di scarsa qualità.⁷¹

⁶⁹https://www.researchgate.net/profile/Vincenza_Cofini/publication/256795292_Confronto_tra_due_test_per_la_sorveglianza_dei_sintomi_depressivi_nella_popolazione/links/0deec52a8218fdf118000000/Confronto-tra-due-test-per-la-sorveglianza-dei-sintomi-depressivi-nella-popolazione.pdf p.5

⁷⁰ FIGURA6- <https://www.dailymail.co.uk/femail/article-2325463/Paralysed-Marathon-heroine-Claire-Lomas-Things-wrong-life-fight-make-luck.html>

⁷¹ <https://webthesis.biblio.polito.it/13042/1/tesi.pdf> p.104

Oggi affinché sia garantita un'efficienza strutturale sia in campo statico che in caso di azioni sismiche agenti, vengono adottate soluzioni progettuali basate sull'impiego di esoscheletri adattivi che fungono da protesi per l'edificio.

L'esoscheletro è una struttura in acciaio autoportante esterna che è realizzata con l'obiettivo di compensare l'obsolescenza strutturale, estetica e funzionale tramite politiche di preservazione della vita umana, di sostenibilità ambientale ed uso razionale delle risorse economiche disponibili.⁷²

La soluzione di demolizione e ricostruzione non è la più vantaggiosa infatti in termini di eco-efficienza energetica gli esoscheletri sono da preferire al cantiere radicale poiché in tal modo vengono minimizzati i rifiuti e l'uso di materie prime, fin dalle fasi iniziali della progettazione.⁷³

Pertanto occorre operare sul patrimonio esistente e gli interventi che possono essere adottati si suddividono in tre categorie principali:

- interventi locali o di riparazione che mirano a ottimizzare le condizioni dei singoli elementi strutturali
- interventi di miglioramento per aumentare la sicurezza strutturale preesistente
- interventi di adeguamento attuati per aumentare la sicurezza strutturale preesistente ottenendo specifici livelli di sicurezza⁷⁴

La soluzione proposta per l'adeguamento di un edificio è quindi l'utilizzo di un esoscheletro esterno che supporta la struttura e consente di rinforzarla e migliorarne l'efficienza termica ed energetica.

E' classificato come un sistema additivo e adattivo in quanto viene applicato e collegato dall'esterno ad una struttura esistente e su una porzione significativa della sua superficie laterale.⁷⁵

E' in grado di adeguarsi all'ambiente e si ispira alla struttura esterna di alcuni invertebrati, come un dispositivo che interviene sull'elemento ripristinandone e migliorandone le caratteristiche.

⁷² <https://webthesis.biblio.polito.it/13042/1/tesi.pdf> p.104

⁷³ <https://re.public.polimi.it/retrieve/handle/11311/1058660/298222/22120-51646-1-PB.pdf> p.3

⁷⁴ <https://webthesis.biblio.polito.it/13042/1/tesi.pdf> p.104

⁷⁵ <http://prev.enea.it/2019-10-18%20ischia-LaccoAmeno-FormisanoA.pdf> p.9

Una struttura di questo tipo può anche essere adattata in relazione al contesto climatico, urbanistico e geografico e in particolare per quanto riguarda l'attività sismica.

Applicato agli edifici si traduce in un'espansione volumetrica indipendente che è costituita da fondazioni autonome e deve ospitare nuovi spazi e fare da supporto a un nuovo involucro personalizzabile ed eventualmente a nuovi sopralzi dell'edificio.⁷⁶

E' quindi strutturato come una gabbia esterna che ha la funzione principale di colmare i deficit della struttura esistente ed è solitamente in acciaio, leggero ed altamente performante in termini di rigidità e di capacità dissipativa.

Grazie l'utilizzo di esoscheletri si ha la possibilità di aumentare l'efficienza energetica con una maggiore sostenibilità ambientale, migliorando anche la qualità di vita.

Spesso alcuni edifici non soddisfano i requisiti minimi di resistenza per quanto riguarda i carichi orizzontali e verticali o hanno superato il limite di vita utile di 50 anni e questi sistemi permettono un miglioramento dal punto di vista strutturale.

Consentono poi di riqualificare esteticamente la struttura e di migliorare il relativo contesto urbano nel quale questa è inserita.

La soluzione proposta è poco invasiva infatti consente di operare senza la necessità di ricollocazione degli inquilini durante la fase di costruzione, il che rappresenta uno dei principali vantaggi.

Le operazioni di riqualificazione sono molto più rapide tanto che vengono ultimate in pochi mesi, contrariamente alla demolizione e ricostruzione le cui tempistiche sono molto lunghe e possono essere impiegati anche più anni.⁷⁷

La struttura può essere consolidata tramite un approccio locale che consiste nel rinforzo puntuale dei nodi del telaio, delle travi e dei pilastri o con un approccio globale, in cui il manufatto viene rinforzato tramite l'affiancamento di elementi sismoresistenti.

Quest'ultima tecnica si traduce con l'aggiunta di un esoscheletro che lavora dall'esterno in forma di doppio involucro, la cui struttura può essere concepita con due soluzioni differenti.⁷⁸

⁷⁶<https://re.public.polimi.it/retrieve/handle/11311/1058660/298222/22120-51646-1-PB.pdf> p.3

⁷⁷ <https://webthesis.biblio.polito.it/13042/1/tesi.pdf> p.113

⁷⁸ <https://re.public.polimi.it/retrieve/handle/11311/1058660/298222/22120-51646-1-PB.pdf> p.3

Nella prima, definita soluzione a pareti, si adottano controventi integrati all'interno dell'esoscheletro mentre nella seconda, in modo più innovativo, si concepisce la progettazione del nuovo involucro come un sistema scatolare sismo-resistente e viene definita soluzione a guscio.

La scelta della soluzione da impiegare dipende dalla rigidità iniziale dell'edificio e ad esempio se si vuole contenere maggiormente le sollecitazioni negli elementi, riducendone quindi lo spessore, viene adottata la soluzione scatolare che permette di impiegare elementi studiati ad-hoc per rispondere al duplice obiettivo di migliorare l'efficienza energetica e la sicurezza dell'edificio.⁷⁹

L'esoscheletro promuove inoltre una nuova cultura di processo e di progetto, in quanto l'adaptive reuse di un manufatto ha come obiettivo l'elaborazione di interventi finalizzati ad azzerare la vulnerabilità strutturale dovuta ad azioni sismiche.⁸⁰

Questa tecnologia sorregge infatti la struttura esistente e si fa carico della maggior parte delle forze orizzontali durante l'azione sismica, tramite l'inserimento di collegamenti puntuali che possono essere rigidi o a molla dissipativa.

Può eventualmente prevedere la realizzazione di una copertura tale da unire le due porzioni laterali di esoscheletro creando una geometria a telaio.

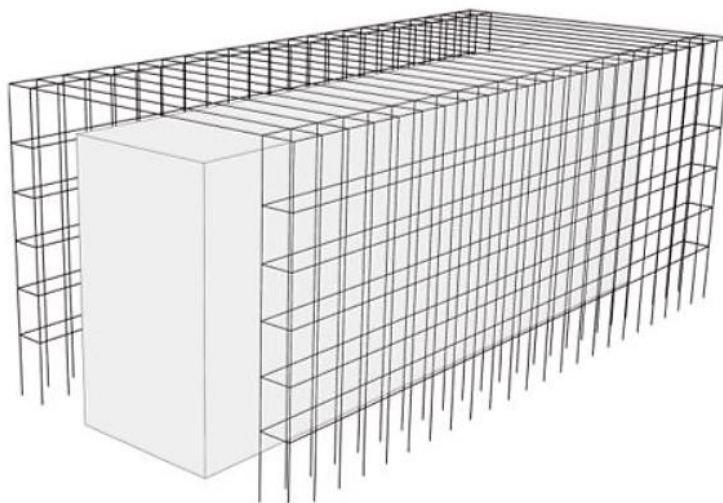


FIGURA7- Esoscheletro strutturale⁸¹

⁷⁹ <https://re.public.polimi.it/retrieve/handle/11311/1058660/298222/22120-51646-1-PB.pdf> p.3

⁸⁰ Ivi, p.5

⁸¹ FIGURA7- <https://www.ingenio-web.it/26816-adeguamento-sismico-mediante-esoscheletro-strutturale>

Grazie all'elevata rigidezza dell'esoscheletro il contributo complessivo dell'azione sismica assorbito dalla struttura esistente si riduce poiché i modi di vibrazione sono caratterizzati da periodi minori e da una maggiore componente orizzontale dell'accelerazione.⁸²

Affinché sia efficace, l'esoscheletro deve essere infatti sufficientemente rigido e resistente in modo da scaricare su di sé l'azione sismica.

Oltre ad aumentare le caratteristiche di rigidezza, esso incrementa anche la resistenza e la capacità dissipativa rispetto all'edificio esistente.

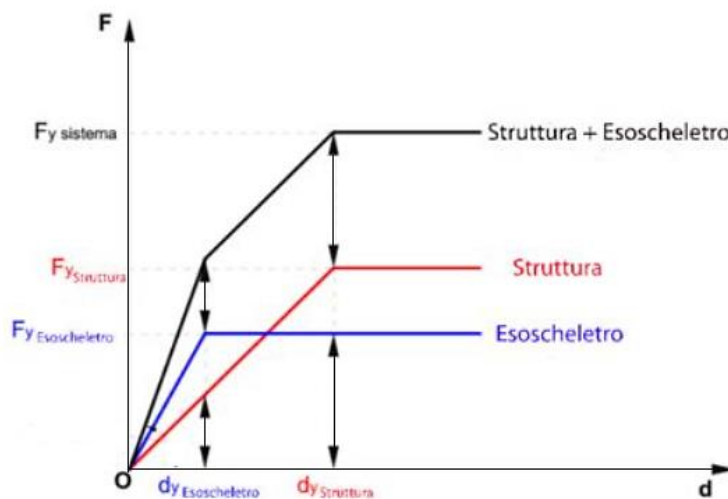


FIGURA8- Benefici della soluzione “esoscheletro strutturale” in termini di protezione antisismica⁸³

Tale metodo rappresenta quindi numerosi vantaggi legati al miglioramento energetico dell'edificio, a quello tecnologico e prestazionale, ad un perfezionamento architettonico e urbanistico in termini di qualità degli spazi ed infine al miglioramento compositivo di facciata.

⁸² <https://www.ingenio-web.it/26816-adeguamento-sismico-mediante-esoscheletro-strutturale>

⁸³ FIGURA8- Ibid

4 MATE COMAU

4.1 Finalità e benefici

Recentemente, sono stati proposti e commercializzati gli esoscheletri passivi degli arti superiori indossabili, come strumenti per migliorare l'ergonomia dei lavoratori in attività ripetitive o fisicamente impegnative.

L'obiettivo delle nuove tecnologie sviluppate in tale contesto è facilitare l'esecuzione di tutte le movimentazioni manuali, ad oggi, compiute ancora dagli addetti.⁸⁴

Per ridurre l'esposizione ai fattori di rischio delle lesioni muscoloscheletriche, infatti, si possono prendere in considerazione tre principali aspetti:

- ridisegnare il luogo di lavoro per ottimizzare l'ambiente e consentire di lavorare in una postura comoda e senza sforzi
- integrare le rotazioni di lavoro
- introdurre pratiche come la formazione dei lavoratori o periodi di riposo periodici⁸⁵

Sostituire gli esseri umani con i robot in compiti ripetitivi legati alle attività degli arti superiori sembrerebbe una possibile soluzione per salvaguardare i lavoratori dall'esecuzione di movimenti faticosi e ripetitivi, mantenendo la produttività.

Tuttavia, molte attività specifiche che comportano l'elevazione della spalla richiedono un'elevata flessibilità e versatilità e non sono ancora realizzabili soluzioni completamente automatizzate.⁸⁶

⁸⁴ <https://webthesis.biblio.polito.it/10534/1/tesi.pdf> p.11

⁸⁵ <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8952904>

⁸⁶ Ibid

A tal proposito Comau ha sviluppato una soluzione alternativa per fornire un'assistenza costante all'Uomo, l'esoscheletro MATE, un sistema altamente ergonomico in grado di replicare accuratamente qualsiasi movimento della spalla, aderendo al corpo come una seconda pelle.⁸⁷

Secondo il sistema di valutazione promosso dalla Fondazione Ergo, ente di riferimento in Italia in materia di organizzazione e misurazione del lavoro ed ergonomia, è stato assegnato un riconoscimento all'esoscheletro Comau MATE, come primo esoscheletro sul mercato ad aver ottenuto la certificazione EAWS (Ergonomic Assessment Worksheet).

Quest'ultima attesta la sua efficacia d'uso nella riduzione del rischio di sovraccarico biomeccanico degli arti superiori dei lavoratori che lo utilizzano per lo svolgimento dei propri compiti quotidiani e in particolare, quelli che richiedono la flessione-estensione delle braccia.⁸⁸

Tale dispositivo è stato sviluppato da Comau in partnership con IUVO, spin-off dell'Istituto di BioRobotica della Scuola Superiore Sant'Anna di Pisa, e con ÖSSUR, azienda islandese leader nel settore dei dispositivi ortopedici non invasivi.⁸⁹

MATE è un esoscheletro meccanico passivo che si distingue per la capacità di supportare spalle e braccia, assecondando il loro movimento naturale e il suo utilizzo consente ai lavoratori di percepire un minor affaticamento fisico, migliorando la qualità globale delle loro attività.

Per questo l'utilizzo di un esoscheletro industriale ha un impatto significativo sui metodi di lavoro all'interno delle aziende, diminuisce lo stress fisico degli addetti e li aiuta a portare a termine i propri incarichi in modo più confortevole, in minor tempo e con una precisione maggiore, il tutto con lo scopo di ridurre la possibilità che nel tempo sviluppino patologie muscoloscheletriche.⁹⁰

⁸⁷ <https://www.plastix.it/comau-presenta-mate-il-nuovo-esoscheletro-indossabile/>

⁸⁸ https://www.comau.com/SiteCollectionDocuments/media/pressrelease/2020/ITA/Comau_MATE_EAW_S_Certification_PR_ITA.pdf p.1

⁸⁹ Ibid

⁹⁰ <https://mate.comau.com/advantages-and-benefits/>

Questo sistema è stato progettato, infatti, per fornire supporto agli arti superiori nei movimenti ripetitivi e nelle attività sopra la testa ed è contrassegnato da due caratteristiche progettuali distintive.

La prima è la sua architettura cinematica uomo-robot altamente ergonomica, mentre la seconda, è un'assistenza bioispirata, creata per compensare parzialmente il peso del braccio dell'utente.⁹¹

Sono stati effettuati test sperimentali per studiare gli effetti del dispositivo sullo sforzo fisico di otto muscoli degli arti superiori e quantificare l'accoppiamento cinematico tra il dispositivo e l'utente, tramite specifici parametri relativi alla cinematica.

I risultati ottenuti da 15 individui hanno mostrato che l'uso di MATE può ridurre le attivazioni elettromiografiche (EMG) dei muscoli degli arti superiori fino al 43% e in particolare, sono state osservate riduzioni significative per la maggior parte dei muscoli degli arti superiori coinvolti nei movimenti di flessione e stabilizzazione della spalla.

Tale sistema è stabile e caratterizzato da un affidabile accoppiamento cinematico, in quanto lo spostamento relativo uomo-robot, registrato durante le attività, è risultato sempre inferiore a 2 mm.⁹²

MATE è stato progettato per fornire un design compatto, senza componenti sporgenti, riducendo così al minimo il rischio di collisione con parti dell'ambiente esterno.

4.2 Design

MATE ha un peso complessivo di 3,5 kg ed è composto da quattro componenti principali.

⁹¹ <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8952904>

⁹² Ibid

Sono presenti le scatole dei generatori di coppia che sono le unità di attuazione passive che immagazzinano e trasformano l'energia elastica di un insieme di due molle parallele in azione assistiva.⁹³

Il sistema di compensazione comprende due ingranaggi collegati, di cui uno è accoppiato al giunto della spalla mentre l'altro non è vincolato alla serie di molle.

Quando il braccio è parallelo al tronco, la forza della molla raggiunge il suo valore massimo e il momento del braccio è nullo rispetto all'asse della molla, generando così una coppia nulla.

All'aumentare dell'elevazione del braccio, la forza elastica diminuisce ma il momento aumenta e questo meccanismo genera una coppia risultante che varia in modo coerente con il profilo della coppia gravitazionale del braccio, in un sollevamento fisiologico della spalla.

Il valore massimo della coppia assistiva, che può essere regolata su quattro livelli discreti, viene quindi raggiunto quando l'angolo di elevazione del braccio è a 90° e gradualmente va a zero quando il braccio è rilassato.⁹⁴



FIGURA9- Livelli discreti MATE⁹⁵

⁹³<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8952904>

⁹⁴ Ibid

⁹⁵ FIGURA9- Ibid

Si ha poi il pHMI (Portable Human Machine Interface) che è costituito da tutte le parti che collegano il dispositivo al corpo dell'utente, come i polsini delle braccia e la cintura e dalla struttura di supporto per la schiena, un telaio in alluminio stampato a forma di T che è progettato per distribuire le forze di reazione prodotte dalle scatole del generatore di coppia all'area pelvica dell'utente, attraverso una cintura personalizzata.⁹⁶

Un altro componente è la catena cinematica pDOF (Principal Direction of Force) che è stata progettata per consentire l'autoallineamento degli assi articolari del dispositivo agli assi articolari umani, riducendo al minimo il trasferimento di forze indesiderate al sistema muscoloscheletrico dell'utente.

Infine, affinché siano soddisfatti i requisiti ergonomici per un montaggio e un'interazione uomo-macchina sicuri ed efficaci, sono state progettate ulteriori regolazioni sulle dimensioni per adattare l'altezza dello schienale, la larghezza del dispositivo, la lunghezza delle spalline, sintonizzare l'orientamento delle scatole di azionamento sul piano frontale e stringere la cintura pelvica.⁹⁷

4.3 MATE e MATE-XT

Dopo i riscontri positivi ricevuti da operatori e dalle imprese che hanno utilizzato la prima versione di MATE, Comau ha presentato una nuova versione, MATE-XT, che soddisfa perfettamente le specifiche esigenze di chi lavora in condizioni difficili in ambiente industriale, non industriale e all'aperto.⁹⁸

⁹⁶ <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8952904>

⁹⁷ Ibid

⁹⁸ <https://www.innovationpost.it/2020/12/02/comau-mate-xt-lesoscheletro-che-aiuta-loperatore-anche-nelle-applicazioni-piu-estreme/>

L'esoscheletro è stato perfezionato nell'arco di due anni, seguendo consigli e feedback trasmessi dalle aziende che hanno strettamente collaborato con Comau, per migliorarne l'utilizzo.⁹⁹

MATE-XT è caratterizzato da una struttura sottile, leggera, in fibra di carbonio e da un sistema di regolazione che permette di adattare il dispositivo in modo rapido a qualsiasi corporatura, ha un design resistente all'acqua, alla polvere, ai raggi UV e ad alte temperature.

Replica i movimenti fisiologici dell'operatore, fornendo un supporto ottimale alla parte superiore del corpo, senza bisogno di batterie, motori o altri dispositivi soggetti a guasti e offre otto diversi livelli di sostegno che l'operatore può impostare o modificare rapidamente senza interrompere la propria attività.¹⁰⁰

L'esoscheletro indossabile MATE-XT può contribuire, inoltre, ad aumentare del 27% la precisione di lavoro durante attività con le braccia sollevate e del 10% la velocità di esecuzione.¹⁰¹

Tale dispositivo è anche altamente traspirante, grazie all'utilizzo di un tessuto ad alte prestazioni sviluppato per condurre attività all'aperto, ha un peso ridotto e un ingombro minore rispetto alla prima versione, in modo da aumentare le prestazioni per soddisfare al meglio le esigenze di un mercato di esoscheletri, in continua espansione.¹⁰²

⁹⁹ <https://www.azetasolutions.com/news/mate-vs-mate-xt.htm>

¹⁰⁰ <https://www.tecnelab.it/news/tecnologie/esoscheletro-comau-robusto-e-leggero-per-ambienti-interni-ed-esterni>

¹⁰¹ <https://www.innovationpost.it/2020/12/02/comau-mate-xt-lesoscheletro-che-aiuta-loperatore-anche-nelle-applicazioni-piu-estreme/>

¹⁰² <https://www.tecnelab.it/news/tecnologie/esoscheletro-comau-robusto-e-leggero-per-ambienti-interni-ed-esterni>

	MATE-XT <i>Extreme</i>	MATE <i>Fit for Workers</i>
Utilizzo	Outdoor & Indoor	Indoor
Grado IP	IP54	IP20
Struttura	Carbonio	Alluminio
Peso	3KG ≈	4KG ≈
Livelli intensità spinta	8	7
Regolazione altezza schiena	6	5
Regolazione ampiezza scapole	Rigida	Elastici
Tessuti	Tecnici traspiranti	Imbottiti
Tempi regolazione e vestizione	60sec	90sec
Larghezza box esterni	4cm	5cm
Meccanismo sicura	Leva	Rotella
Dimensioni chiusure velcro	Piccole	Medie
Kit "Food&Pharma"	Disponibile	Disponibile
Anno di lancio	2021	2019

Design



FIGURA10- MATE e MATE-XT¹⁰³

CONCLUSIONE

Il presente lavoro di tesi ha lo scopo di indagare sulle criticità delle diverse modalità di svolgimento delle attività lavorative e mira ad evidenziare l'importanza di soluzioni ergonomicamente corrette.

¹⁰³FIGURA10- <https://www.azetasolutions.com/news/mate-vs-mate-xt.htm>

Azioni ripetitive e prolungate nel tempo sono, infatti, la causa dell'insorgenza di malattie muscoloscheletriche in ambiente lavorativo.

A tal fine è proposto l'utilizzo di esoscheletri non solo per prevenire la manifestazione di disturbi legati alle attività svolte e garantire quindi ambienti sicuri, migliorare la salute, il comfort e le prestazioni degli utenti ma anche per fornire un supporto fondamentale nei percorsi di neuroriabilitazione.

L'elaborato inizialmente presenta una definizione di ergonomia di processo che è focalizzata sul perseguimento del benessere dell'Uomo attraverso lo sviluppo di tecniche e metodologie che riguardano la posizione assunta dai lavoratori, i fattori ambientali, come il tipo di illuminazione, le operazioni e le informazioni percepite e l'organizzazione del lavoro.

Dalle ricerche effettuate è emerso che un prodotto ergonomico si distingue per il suo grado di usabilità che viene misurata in relazione a certi utenti e a certi compiti.

Per una corretta progettazione e valutazione ergonomica di un sistema è, infatti, necessario prendere in considerazione la tipologia di persone che lo userà, le loro abilità, il livello culturale, l'età e il grado di "expertise" specifico per il compito in questione.

Allo scopo di fornire un supporto agli utenti che si occupano della valutazione della sicurezza, è stato studiato il progetto intERA che dopo aver individuato le aziende presso le quali condurre l'osservazione, ha elaborato un software costituito da quattro moduli che forniscono una guida sulle caratteristiche dell'ambiente, della postazione e delle attrezzature che determinano le condizioni ergonomiche.

E' importante sottolineare che tale metodo è risultato efficace poiché oltre ad individuare le criticità, offre l'opportunità di adottare interventi di miglioramento e verificarne preventivamente la validità, simulando le nuove condizioni nell'inserimento dei dati e senza standardizzare le diverse attività.

La tesi focalizza poi l'attenzione sugli esoscheletri, ritenuti una valida soluzione per supportare l'attività umana.

Nonostante oggi ci siano ancora alcuni rischi legati al loro utilizzo e in particolare, per quando riguarda il loro design e funzionalità, essi offrono numerosi vantaggi in quanto

consentono di sollevare carichi con sforzi e sollecitazioni minori e di svolgere lavori ripetitivi con minor fatica poiché sono in grado di distribuire il peso in modo più equilibrato.

Da quanto emerso, grazie ai loro benefici, oggi hanno una vasta applicazione in diversi ambiti lavorativi.

Viene inizialmente studiato l'utilizzo di esoscheletri per l'industria e in modo specifico è analizzato il Chairless chair, un dispositivo che attraverso un ammortizzatore collegato al telaio, scarica il peso corporeo a terra e consente quindi di riposare i muscoli delle gambe come se l'utente fosse in posizione seduta.

In seguito ai test effettuati tale dispositivo è risultato sicuro, efficace e facilmente utilizzabile, senza la necessità di una manutenzione frequente.

E' stato poi affrontato l'utilizzo di esoscheletri in campo medico e in particolare, per quanto riguarda la neuroriabilitazione.

Questi sistemi si sono rivelati importanti soprattutto per le fasi iniziali della deambulazione, dal momento che consentono anche di personalizzare il trattamento e renderlo specifico per ciascun paziente, fornendo così una sessione terapeutica rigorosa e mirata.

Sono descritti in modo specifico l'esoscheletro Ekso, la cui programmazione avviene attraverso un display accessibile al fisioterapista che assiste sempre il paziente e l'esoscheletro Phoenix, in cui l'utilizzatore può controllare autonomamente le funzioni.

L'utilizzo di esoscheletri dall'analisi effettuata è risultato quindi un valido investimento poiché, nonostante i costi iniziali, favorisce la sanità anche dal punto di vista economico in quanto permette di aumentare la quantità di pazienti che un fisioterapista può curare.

Viene poi affrontata l'applicazione in campo edile in cui l'utilizzo di esoscheletri adattivi è risultato vantaggioso poiché si ha la possibilità di apportare un'ottimizzazione dell'edificio dal punto di vista energetico e strutturale, un perfezionamento architettonico e urbanistico e un miglioramento compositivo di facciata.

Inoltre, da quanto analizzato è emerso che tale metodo è molto rapido e poco invasivo, tanto che consente di operare senza la necessità di ricollocazione degli inquilini.

Infine viene studiato l'esoscheletro MATE, un dispositivo passivo in grado di ridurre il rischio di sovraccarico degli arti superiori, assecondando il loro movimento naturale.

Tale sistema si è rivelato particolarmente efficace in quanto è in grado di ridurre lo stress fisico degli utenti in maniera significativa, permettendo quindi di svolgere le mansioni in minor tempo e con maggiore precisione.

Infatti, in seguito a test sperimentali, grazie all'uso di MATE, si è registrata una riduzione delle attivazioni elettromiografiche dei muscoli degli arti superiori fino al 43% e in particolare, di quelli impiegati nei movimenti di flessione e stabilizzazione della spalla.

Viene analizzata poi una nuova versione MATE-XT, che in seguito a delle modifiche è emerso che è in grado di aumentare del 27% la precisione di lavoro durante attività con le braccia sollevate e del 10% la velocità di esecuzione.

Per concludere, anche se gli aspetti positivi relativi all'utilizzo di esoscheletri sono molteplici, in futuro dovranno essere effettuati degli studi volti a migliorare il design e ad affrontare alcuni problemi con l'obiettivo di realizzare dispositivi sempre più leggeri, utilizzando materiali di alta qualità per garantire una maggiore resistenza e per soddisfare le esigenze e i desideri degli utenti, in un mondo in continua evoluzione.

SITOGRAFIA

https://www.frareg.com/cms/wp-content/uploads/INAIL_glossario_ergonomia.pdf

https://books.google.it/books?hl=it&lr=&id=xFXODQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA32&dq=protocolli+per+la+valutazione+di+un+processo+ergonomico&ots=1ZbRBC1e82&sig=p9Wf7H5DknArW9vCRunqEn9x_kU&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false

Giuseppe di Bucchianico

<http://progettointera.it/fattori-e-macro-indicatori-di-rischio-in-intera/>

ER LA https://www.researchgate.net/profile/Raffaele_Dangelo2/publication/274637932_INTERA_STRUMENTI_PVALUTAZIONE_ERGONOMICA_DEGLI_AMBIENTI_DI_LAVORO/li, R. D'ANGELO*, P.S. D'ONOFRIO*, E. ATTAIANESE**, G. DUCA**

<http://progettointera.it/la-task-analysis/>

<https://www.iioehy.it/index.php/IJOEHY/article/view/273>

https://www.iss.it/documents/20126/45616/18_10_web.pdf/5db74607-7623-433a-3fbb-db5b5b586819?t=1581099384560#page=24

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580520310736>

<http://www.bollettinoadapt.it/potenzialita-e-limiti-delluso-degli-esoscheletri-nel-recente-rapporto-eu-osha/?pdf=91738>

<https://core.ac.uk/download/pdf/19204609.pdf>

<https://hfitaly.com/esoscheletrilavoro/#:~:text=Vi%20sono%20molti%20benefici%20ne ll,precisione%20in%20modo%20pi%C3%B9%20veloce.>

<http://www.galm.it/luso-degli-esoscheletri-in-riabilitazione/>

<https://www.riabilitazioneinfo.it/fisioterapia-e-robotica-la-robotica-un-innovativo-strumento-al-servizio-del-fisioterapista-e-dei-suoi-interventi-riabilitativi-di-anna-boido-dottore-in-fisioterapia/>

<https://www.doveecomemicro.it/enciclopedia/anatomia/robotica>

<https://www.automationtomorrow.com/quali-applicazioni-industriali-per-gli-esoscheletri/>

[file:///C:/Downloads/RamachandranCCESFairReport2018%20\(1\).](file:///C:/Downloads/RamachandranCCESFairReport2018%20(1).)

https://www.ripublication.com/ijtam17/ijtamv12n4_03.pdf

https://ijsret.com/wp-content/uploads/2020/01/IJSRET_V6_issue1_187.pdf

<https://webthesis.biblio.polito.it/9385/1/tesi.pdf>

<https://tesi.supsi.ch/2256/1/Riccardi%20Mattia%20e%20Fuchs%20Daniele.pdf>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0094114X20303633>

<http://www.fondazionecentripadrepio.it/lesoscheletro-exso-in-dotazione-alla-fondazione-unica-struttura-in-tutto-il-sud-italia/>

http://research.vuse.vanderbilt.edu/cim/research_orthosis.html

<https://www.disabili.com/prodotti/articoli-qprodotti/esoscheletro-in-riabilitazione-per-paziente-mieloleso-funziona>

[https://files.orthomedica.it/webpages/1000/1031/\[STAMPA%20INTERNA\]%20%20Esoscheletro%20Phoenix%20-%20No%20Codifica.pdf](https://files.orthomedica.it/webpages/1000/1031/[STAMPA%20INTERNA]%20%20Esoscheletro%20Phoenix%20-%20No%20Codifica.pdf)

[https://files.orthomedica.it/webpages/1000/1031/\[STAMPA%20INTERNA\]%20-%20Esoscheletro%20Phoenix%20-%20No%20Codifica.pdf](https://files.orthomedica.it/webpages/1000/1031/[STAMPA%20INTERNA]%20-%20Esoscheletro%20Phoenix%20-%20No%20Codifica.pdf)

https://www.researchgate.net/profile/Vincenza_Cofini/publication/256795292_Confronto_tra_due_test_per_la_sorveglianza_dei_sintomi_depressivi_nella_popolazione/links/0deec52a8218fdf118000000/Confronto-tra-due-test-per-la-sorveglianza-dei-sintomi-depressivi-nella-popolazione.pdf

<https://www.dailymail.co.uk/femail/article-2325463/Paralysed-Marathon-heroine-Claire-Lomas-Things-wrong-life-fight-make-luck.html>

<https://webthesis.biblio.polito.it/13042/1/tesi.pdf>

<https://re.public.polimi.it/retrieve/handle/11311/1058660/298222/22120-51646-1-PB.pdf>

<http://prev.enea.it/2019-10-18%20ischia-LaccoAmeno-FormisanoA.pdf>

<https://www.ingenio-web.it/26816-adeguamento-sismico-mediante-esoscheletro-strutturale>

<https://webthesis.biblio.polito.it/10534/1/tesi.pdf>

<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8952904>

<https://www.plastix.it/comau-presenta-mate-il-nuovo-esoscheletro-indossabile/>

https://www.comau.com/SiteCollectionDocuments/media/pressrelease/2020/ITA/Comau_MATE_EAWS_Certification_PR_ITA.pdf

<https://mate.comau.com/advantages-and-benefits/>

<https://www.innovationpost.it/2020/12/02/comau-mate-xt-lesoscheletro-che-aiuta-loperatore-anche-nelle-applicazioni-piu-estreme/>

<https://www.azetasolutions.com/news/mate-vs-mate-xt.htm>

<https://www.tecnelab.it/news/tecnologie/esoscheletro-comau-robusto-e-leggero-per-ambienti-interni-ed-esterni>

RINGRAZIAMENTI

Desidero ringraziare il professor Giacomo Palmieri, relatore di questa tesi, per la sua disponibilità e per la guida fornita durante la stesura dell'elaborato.

Ringrazio i miei genitori che mi hanno sostenuta in tutte le decisioni con consigli preziosi e rispettando sempre i miei spazi, siete per me un esempio da seguire.

Un grazie speciale va a mia sorella Noemi che, nonostante abbia passato un periodo difficile, ha sempre riservato del tempo per ascoltarmi e supportarmi e alla mia gemella Gaia che è una parte di me. Il legame che c'è tra noi è qualcosa di inspiegabile, non saprei immaginare la mia vita senza condividere tutto con lei.

Grazie alle amiche di sempre Martina, Angelica, Martina, siete per me come sorelle, abbiamo affrontato tanti momenti insieme e mi siete rimaste sempre accanto sia in quelli più difficili che in quelli felici. Con voi sono cresciuta, riuscite a capirmi anche prima di parlare e so che anche se prenderemo strade diverse il nostro legame non cambierà mai.

Ringrazio le amiche dell'università, con le quali purtroppo questo ultimo anno ho trascorso a distanza. Siamo riuscite comunque ad aiutarci come abbiamo sempre fatto, senza perdere i contatti grazie alle numerose chiamate su Teams e agli audio lunghissimi. Questa esperienza senza di voi non sarebbe stata la stessa cosa.

Infine, vorrei ringraziare tutte le persone con cui ho condiviso bei momenti della mia vita e spero di poter continuare a condividere nuove esperienze e traguardi. Grazie di cuore, vi voglio bene.