



POLITECNICO DI TORINO

Corso di laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica
indirizzo Automazione

Tesi di laurea magistrale

*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*

Relatore

Prof. Terenziano Raparelli

Correlatori

Prof.ssa Gabriella Eula

Prof. Luigi Mazza

Candidato

Francesco Pietrafesa s250567

A.A. 2019/2020

Abstract

Nel seguente elaborato, viene sviluppata la progettazione di un esoscheletro per uso industriale, pensato per il supporto del tronco di un operatore durante la flessione in avanti e la sosta stazionaria nello svolgimento delle sue mansioni lavorative. In particolare, si tratta di un esoscheletro attivo azionato da due motori pneumatici rotativi che trasmettono coppia, tramite un sistema di trasmissione a cinghia, a due strutture di supporto, una per il busto ed una per le gambe. Il candidato si è occupato della revisione delle componenti progettate, della messa in produzione dei componenti mancanti, dell'assemblaggio completo del dispositivo e della progettazione di un sistema di simulazione della persona atto a permettere l'effettuarsi di test statici e dinamici. Il candidato ha effettuato una ricerca bibliografica con lo scopo di raccogliere informazioni riguardo le tipologie e metodologie di test presenti oggi nei riguardi dei dispositivi esoscheletrici.

Indice

Abstract	1
Indice	2
Introduzione	4
Capitolo 1.....	5
Lo stato dell'arte sugli esoscheletri e sulle metodologie di test	5
1.1 Storia	6
1.2 Classificazione	6
1.3 Esoscheletri industriali	8
1.4 Metodologie e caratteristiche generali di test per robot indossabili.....	9
1.4.1 Classificazione delle prestazioni.....	10
1.4.2 Metodi di test per la sicurezza dell'operatore.....	12
1.5 I test oggi	13
1.6 Simulatori per test standard di valutazione delle prestazioni su esoscheletri per il supporto lombare	15
1.7 Ergonomia degli esoscheletri ad uso industriale e relative problematiche.....	16
1.7.1 Cause dell'incompatibilità cinematica.....	17
Capitolo 2.....	18
Costruzione e assemblaggio dell'Esoscheletro.....	18
2.1 Descrizione esoscheletro.....	19
2.2 Revisione e modifiche prima della produzione	22
2.3 Ricerca costruttori per realizzazione dei pezzi mancanti.....	23
2.4 Assemblaggio dell'esoscheletro	25
Capitolo 3.....	26
Progettazione di un banco prova per test su esoscheletri industriali per il supporto dell'operatore.....	26
3.1 Idea iniziale e sviluppo.....	26
3.2 Prima bozza del banco prova.....	28
3.3 Prototipo definitivo e sue varianti sulla base dei metodi di simulazione delle forze e dei momenti durante test statici e dinamici.....	31
3.3.1 Struttura di base.....	31
3.3.2 Prima soluzione, utilizzo di loop bands e zavorre esterne per test statici e dinamici.....	34

3.3.3	La struttura del bacino	39
3.3.4	Montaggio dell'esoscheletro sul simulatore – prima proposta	41
3.3.5	Seconda soluzione, utilizzo di loop bands e pesi sciolti innestati sulla struttura.....	42
3.3.6	Pro e contro delle prime due proposte per il simulatore di persona	43
3.3.7	Terza soluzione, utilizzo di due attuatori pneumatici lineari per la simulazione delle forze di spinta e di quelle resistenti.....	44
3.3.8	Montaggio dell'esoscheletro sul simulatore – terza proposta	47
3.3.9	Considerazioni sulla terza proposta del simulatore della persona	48
3.3.10	Vantaggi della terza proposta per il simulatore di persona.....	48
3.4	Studio del montaggio di una diversa tipologia di esoscheletro per il sostegno busto sul simulatore della persona.....	49
3.4.1	Criticita' rilevate nell'assieme e possibili soluzioni.....	50
3.5	Confronto con tipologie di simulatori gia' esistenti	52
Capitolo 4	.....	55
Conclusioni	.....	55
Capitolo 5	.....	56
Sviluppi futuri	.....	56
Appendice A	.....	57
Appendice B	.....	61
Appendice C	.....	70
Appendice D	.....	71
BIBLIOGRAFIA	.....	74
Ringraziamenti	.....	76

Introduzione

Il candidato ha preso parte al progetto di un prototipo di esoscheletro attivo per uso industriale (*Figura 1*) per il sostegno dell'operatore durante operazioni manuali che implicano flessione prolungata del busto. Il progetto è stato ereditato da tesisti precedenti e sviluppato presso i laboratori del DIMEAS del Politecnico di Torino.

Nello specifico, il candidato si è occupato inizialmente di ultimare lo sviluppo e la modifica degli ultimi componenti mancanti, infatti alcune parti erano già state progettate in via definitiva e mandate in produzione dal tesista precedente (iter di progettazione riportato in [9]), dell'ordine e assemblaggio di tutta la struttura esoscheletrica e della progettazione di un simulatore di persona, atto a emulare il movimento di flessione del busto e del bacino umani, per i futuri test a banco.

Nel dettaglio, l'exoscheletro in fase progettuale, è un dispositivo ad attuazione pneumatica i cui motori rotativi sono regolati mediante una valvola proporzionale, mentre la trasmissione del moto è garantita da un sistema cinghia-puleggia. Per quanto concerne la struttura di base, essa è suddivisa in tre parti: il giunto d'anca motorizzato, il backframe ed il leg link.

Lo sviluppo del controllo, che verrà effettuato successivamente, dovrà permettere alla struttura di assistere l'operatore durante la flessione del busto e sorreggerne una parte del peso (circa il 30%), in modo tale da ridurre il carico sui muscoli della spina dorsale e di conseguenza i dolori lombari connessi allo sforzo.

Il candidato ha infine condotto una ricerca bibliografica atta a identificare quelli che sono gli standard per la progettazione e per i test sui dispositivi esoscheletrici indossabili dal punto di vista delle normative, delle metodologie, delle tipologie e dell'ergonomia.

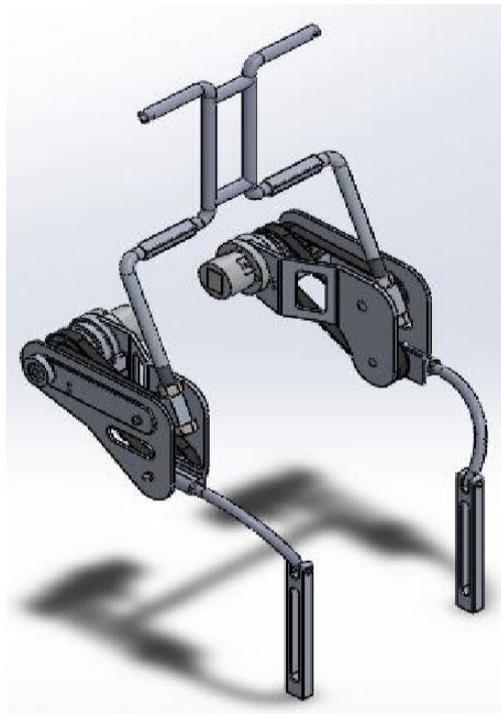


Figura 1 esoscheletro in fase di progettazione presso i laboratori del DIMEAS [9]

Capitolo 1

Lo stato dell'arte sugli esoscheletri e sulle metodologie di test

Nelle aziende, pur avendo avuto una diffusione su larga scala di robot industriali e meccanismi di automazione industriale, molti lavori sono ancora svolti manualmente dall'uomo perché sono compiti che necessitano di abilità, capacità decisionali e capacità di movimento che solo l'essere umano riesce a garantire [3].

Nella maggior parte degli ambienti lavorati non è raro imbattersi in persone soggette a dolori fisici derivanti dalle loro mansioni, le quali li costringono, a seconda dei casi, a rimanere per diverso tempo in posizioni scomode oppure a sollevare carichi pesanti per buona parte del loro periodo lavorativo.

Sta crescendo quindi sempre maggior interesse per l'utilizzo di esoscheletri industriali indossabili che possano aiutare l'uomo a svolgere attività manuali (*Figure 2 e 3*), evitando così l'insorgere di problemi fisici come dolori lombari e alle spalle [2].



Figura 2 e 3 esempi di esoscheletri ad uso industriale [10]

Un esoscheletro può essere definito come una struttura meccanica esterna indossabile in grado di amplificare le capacità di un uomo, fungere da dispositivi di assistenza in grado di supportare il peso della persona o sostenere il peso di un oggetto durante il sollevamento e lo spostamento [1].

Gli esoscheletri sono nati inizialmente in ambiente militare per poi espandersi su altri ambiti, come quello medico riabilitativo (*Figura 4*) e quello industriale.

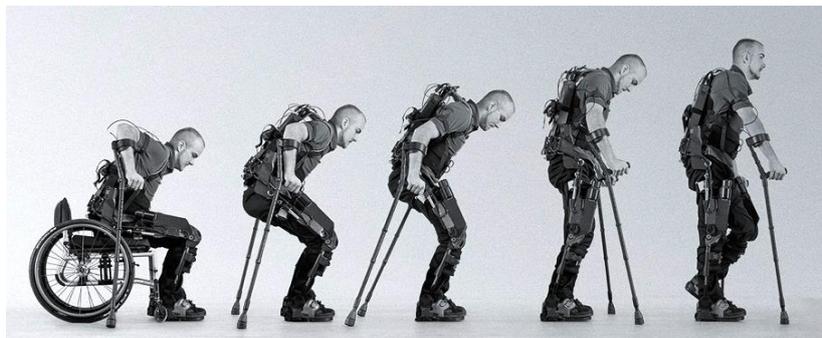


Figura 4 esempio di utilizzo riabilitativo [10]

1.1 Storia

Sin dal 1830, l'idea di un dispositivo meccanico capace di affiancarsi e assistere il corpo umano è sempre stata fonte di motivazione per gli inventori. L'idea di un dispositivo indossabile a vapore concepito per aiutare le persone a camminare ha ispirato molti, fino a che, intorno al 1890, fu progettato un dispositivo con molle in grado di permettere ai soldati russi di saltare più in alto e correre più veloce. A causa dell'arretratezza tecnologica dei tempi però, molte di queste idee rimasero solamente sulla carta. Il primo esoscheletro moderno fu concepito per l'uso industriale nel 1965; si trattò di un esoscheletro full body in grado di permettere all'operatore di sollevare carichi pesanti. A causa della complessità meccanica e del peso elevato però, questo esoscheletro non vide mai la luce, ma fu portata avanti solamente la progettazione del modulo delle braccia [4].

1.2 Classificazione

Oggi gli esoscheletri sono diffusi in numerosissimi campi e ne esistono moltissime tipologie. Possiamo classificare gli esoscheletri nei seguenti modi:

- **Attivi o passivi:** un esoscheletro è considerato attivo quando possiede uno o più attuatori che permettono l'incremento della forza dell'uomo e aiutano nei movimenti le articolazioni del corpo; come attuatori si possono avere motori elettrici o idraulici, muscoli pneumatici e altre tipologie. Per esoscheletro passivo invece, si intende un dispositivo che non utilizza alcun tipo di attuttore, ma utilizza materiali o molle in grado di immagazzinare l'energia, generata durante il movimento dell'uomo, e usarla quando richiesta per supportare il corpo umano durante movimenti o posture: ad esempio un esoscheletro passivo può immagazzinare energia durante la flessione e utilizzarla per aiutare l'operatore a risollevarsi. Naturalmente esistono esoscheletri ibridi, ovvero che grazie alla loro struttura riescono a funzionare sia da attivi sia da passivi: nell'immagine proposta (*Figura 5*), si riporta un esempio di esoscheletro per il supporto nel sollevamento degli oggetti in cui si ha un'azione passiva, nella zona di supporto per la schiena, grazie ad aste flessibili in fibra di carbonio, mentre un'azione attiva, nel supporto alle gambe, grazie ad un attuttore elettrico [3,5].

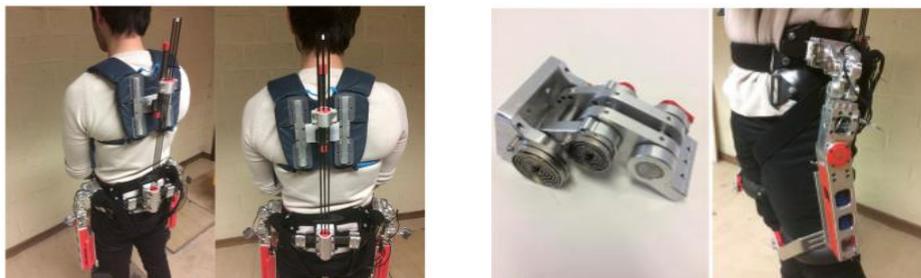


Figura 5 esempio di esoscheletro per il sollevamento costituito da una parte attiva per gli arti inferiori e una passiva per il sostegno del busto [5]

- ***In base all'area supportata:*** esoscheletri per gli arti inferiori, per gli arti superiori, per entrambi oppure esoscheletri per sostegno del busto. Nelle figure 5 e 6 sono portati come esempio due tipi di esoscheletro, uno per gli arti inferiori (Hyundai)(Figura 7) e uno per quelli superiori (COMAU) (Figura 6) [3].



Figura 6 MATE di COMAU



Figura 7 esoscheletro di Hyundai per gli arti inferiori

- ***In base al modo in cui l'exoscheletro si adatta o emula l'antropometria umana:*** gli esoscheletri antropomorfi infatti, a differenza di quelli che non lo sono, possiedono articolazioni che si adattano ai movimenti rotatori di quelle umane: un esoscheletro completo di tipo antropomorfo è in grado di riprodurre gli stessi movimenti dell'operatore che lo indossa, permettendogli di avere una grande libertà di movimento. Nella figura 8 è riportato un esempio di esoscheletro full body per uso militare (XOS 2) (Figura 8), si può notare come esso si adatti perfettamente al corpo dando molta libertà nel movimento [3].



Figura 8 esoscheletro XOS 2 [6]

1.3 Esoscheletri industriali

Parlando nello specifico dell'ambito industriale, è difficile trovare un compromesso tra il comfort del lavoratore e la mansione che esso deve svolgere; quando vi sono determinati vincoli da rispettare nello svolgimento di uno specifico lavoro, non è possibile adattare totalmente l'attività al lavoratore, in modo tale da garantirne un comfort adeguato. Di conseguenza, alcune postazioni di lavoro risultano essere fonte di stress per il fisico e comportano posture scomode (*Figura 9*). In alcuni casi, lo sforzo intenso, l'alta frequenza e persino posture statiche scomode sono identificati come fonti di disturbi muscoloscheletrici (DMS): percepiti come dolore, perdita di forza, rigidità articolare o goffaggine, i DMS sono i principali problemi di salute legati al lavoro ed hanno un grave impatto sulla qualità della vita e della produttività dei lavoratori [4].



Figura 9 esempi di attività lavorative a rischio [4]

1.4 Metodologie e caratteristiche generali di test per robot indossabili

La progettazione di un esoscheletro indossabile prevede anche delle fasi di test. Il prototipo, una volta costruito, dovrà essere testato per verificarne funzionalità, prestazioni ma soprattutto sicurezza nei confronti dell'operatore che lo andrà ad indossare.

Secondo informazioni tratte dall'articolo [1], le prestazioni, l'ergonomia, gli impatti sulla salute, la sicurezza a lungo termine e altri effetti sull'uomo non sono ancora stati studiati e compresi. L'Organizzazione Internazionale per la Standardizzazione (ISO) 13482 è stata sviluppata nel corso di diversi anni e pubblicata nel 2014 per affrontare le problematiche di sicurezza dei robot, compresi gli esoscheletri, utilizzati come dispositivi di cura personale. Tuttavia, lo standard di sicurezza non prevede norme sulla raccolta e l'analisi dei dati da utilizzare come base per la comprensione degli effetti a lungo termine.

Sono quindi necessari metodi di prova che definiscano quelle che dovranno essere le modalità di raccolta e analisi dei dati sulle prestazioni che, successivamente, consentiranno ai produttori e agli utenti di replicarli.

Le prestazioni degli esoscheletri devono essere affiancate anche da alcune considerazioni relative alla loro sicurezza; ad esempio: quali sono i problemi derivanti dall'applicazione di un dispositivo agli arti inferiori di un individuo per assisterlo o aumentarne le capacità nello svolgimento di determinati compiti; come deve essere progettato un dispositivo per garantire la sicurezza di un operatore nel caso di trasporto, o sollevamento, di carichi pesanti per un lungo periodo, in modo tale da evitare il sovraccarico delle articolazioni o evitare di provocare un'irritazione della pelle o altri danni.

I metodi di test per la sicurezza e per le prestazioni standard degli esoscheletri inoltre, permetterebbero di ottenere misurazioni utilizzabili, ad esempio, migliorarne il movimento, aumentarne o prolungarne la capacità di sollevamento, ecc... (Fonte [1] 2018).

1.4.1 Classificazione delle prestazioni

È importante classificare le caratteristiche delle prestazioni dei sistemi sotto test per confrontare i risultati tra i vari sistemi, nonché per confrontare le capacità del sistema nello svolgere i compiti per cui è stato progettato.

Le funzionalità pratiche dei robot industriali non considerano in genere la presenza e l'intervento dell'uomo, poiché la maggior parte delle funzioni dei robot sono automatiche e scollegate dal controllo umano. La situazione sta cambiando, poiché stanno diventando disponibili robot collaborativi che funzionano fianco a fianco con gli esseri umani [1].

Le caratteristiche relative alla risposta ai comandi dei robot includono invece l'uomo, poiché i robot sono principalmente controllati a distanza dagli esseri umani e i compiti possono includere la ricerca e l'interazione con obiettivi fisici.

Secondo l'articolo [1], vi sono alcune di queste caratteristiche e funzionalità, riguardo l'interazione uomo-robot, che possono essere applicate anche agli esoscheletri:

- **Navigazione:** capacità dell'esoscheletro di aiutare chi lo indossa a rimanere stabile con un'andatura a passo corto o lungo, quando si cammina, si corre, si striscia, e anche quando la normale attività viene interrotta o vengono eseguiti altri movimenti.
- **Percezione:** capacità dell'esoscheletro di identificare i movimenti del corpo e utilizzare l'input percepito per controllare il successivo movimento o i successivi movimenti previsti.
- **Gestione dei compiti:** capacità dell'esoscheletro di reagire a ostacoli improvvisi, ad esempio identificando input sensoriali dal corpo, e quindi reagire in modo appropriato a tali situazioni di emergenza per evitare la collisione o attenuarne gli effetti.
- **Manipolazione:** capacità di un esoscheletro per gli arti superiori di muovere il braccio in modo appropriato per il compito, con o senza carico.

Altri effetti che possono influire sulle funzionalità appena citate sono: la comunicazione (ritardo, jitter e larghezza di banda), la risposta del robot (reazione all'input sensoriale da parte di chi lo indossa), l'utente (cioè dimensioni, massa, profilo, potenza del segnale, segnali attesi).

Le funzionalità fornite dall'esoscheletro inoltre, una volta che viene indossato ed utilizzato dall'uomo, devono essere confrontate con quelle gestibili dall'uomo quando esso non indossa, non controlla o non è influenzato dal robot stesso.

Pertanto, le metriche aggiuntive delle prestazioni dell'esoscheletro, rispetto a quelle elencate in precedenza, risultano essere:

- **Durata:** tempo massimo che un compito può essere eseguito con l'uso di un esoscheletro rispetto al compito che viene eseguito senza l'esoscheletro
- **Velocità:** velocità che possono essere raggiunte e sostenute con l'uso di un esoscheletro rispetto al compito che viene eseguito senza l'esoscheletro
- **Accelerazione/decelerazione:** accelerazioni/decelerazioni che possono essere ottenute con l'uso di un esoscheletro rispetto a quelle ottenute senza l'esoscheletro.

- **Pose Uncertainty**: precisione/risoluzione (nello spostarsi e orientarsi in una posizione richiesta) e ripetibilità (posizionarsi più volte nella stessa posizione richiesta) dell'esoscheletro nel posizionare e orientare a comando il braccio o la gamba dell'operatore.
- **Manovra verticale (Navigazione)**: capacità di attraversare pendenze, gradini, terreni ondulati (per esoscheletri su arti inferiori) e di sollevare carichi (per esoscheletri su arti superiori).
- **Manovra orizzontale (Navigazione)**: capacità di muovere il corpo, o il busto, in avanti, indietro, da un lato all'altro (per esoscheletri su arti inferiori e su busto) e di muovere le braccia in avanti, indietro, da un lato all'altro (per esoscheletri su arti superiori).
- **Ergonomia**: misura del comfort (dolore, fatica) e della postura del corpo quando si indossa un esoscheletro.
- **Complessità di ingresso/uscita**: difficoltà a mettere o togliere l'esoscheletro
- **Facilità d'uso**
- **Altro**: costo, portabilità, durata della batteria, ambiente, sicurezza informatica.

Le complicazioni sorgono quando si include l'ergonomia, in quanto il comfort e la postura non sono caratteristiche tipiche della robotica industriale non indossabile.

La normativa ISO 13482 (2014), per i robot adibiti al supporto della persona, copre i protocolli di sicurezza per tre tipi di robot: servo mobile, porta-persone e assistente fisico. Gli esoscheletri sono descritti come robot assistenti fisici e, nella normativa, sono descritte le loro procedure di valutazione e mitigazione dei rischi per la sicurezza [1].

Esperti provenienti da Cina, Francia, Germania, Giappone, Corea, Regno Unito, Corea, Stati Uniti e altri paesi stanno sviluppando uno standard per gli esoscheletri per fornire metodi di test per la normativa ISO 13482.

1.4.2 Metodi di test per la sicurezza dell'operatore

L'attuale bozza della relazione tecnica inerente ai metodi di prova relativi alla sicurezza (ISO/Commissione (CD) 23482-1 Robotica - Applicazione della ISO 13482 – Parte1), contiene sezioni riguardanti le caratteristiche di rischio fisico per i "robot indossabili", lo stress per la pelle, e criteri e procedure per i test a loro riguardo (fonte [1]).

Il metodo di test per verificare lo "stress per la pelle" descrive tre fasi che utilizzano la simulazione e un manichino di prova per definire, testare e registrare le caratteristiche di contatto e il carico massimo sul corpo umano nel punto in cui l'esoscheletro è indossato.

La procedura, descritta nell'articolo [1], prevede il fissaggio di un "bracciale robotizzato" ad un manichino con pelle artificiale, l'applicazione di modelli di carico tramite un dispositivo, che muove questo bracciale per un determinato tempo di carico, e la misurazione del carico massimo durante la prova. Le misurazioni del carico vengono poi registrate con un processo di registrazione dei dati descritto sempre nella normativa.

Inoltre, la bozza di norma fornisce un metodo di prova che "ispeziona i danni visibili (ad esempio, la frattura, la deformazione o il disimpegno di parti) ed i danni funzionali (ad esempio, l'anomalia del sistema di controllo) di un dispositivo in continuo movimento al fine di stimare la durabilità per tutta la sua vita di progetto"[1].

1.5 I test oggi

Dallo studio e dalla ricerca riguardo le metodologie di test applicate oggi dalle aziende per lo sviluppo dei loro progetti in ambito esoscheletrico, è risultato che nella maggior parte dei casi i prototipi vengono testati direttamente sull'uomo e solo in specifici casi a banco.

I test su uomo sono di solito i più accurati poiché, testando direttamente il prototipo sull'utilizzatore finale, è possibile valutare subito quali sono le criticità e dunque agire direttamente per migliorare il sistema. È molto comune in questi casi l'utilizzo di un sistema di motion capture (*Figura 10*) durante le varie prove: l'operatore ed il sistema da testare sono equipaggiati con sensori e marker in punti specifici, di solito corrispondenti a giunti e arti, e un sistema di videocamere permette di catturare i vari movimenti compiuti e valutare carichi e sforzi in presa diretta.

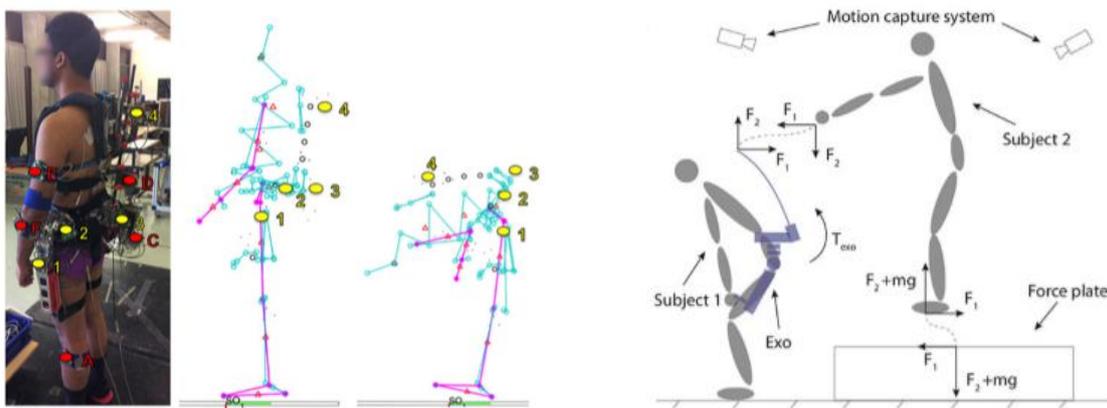


Figura 10 sistema con motion capture e markers per test dinamici [5]

L'utilizzo di banchi prova è di solito limitato all'uso su singole componenti dell'esoscheletro per test relativi, ad esempio, a resistenza a flessione di componenti di supporto (*Figura 11*), test su attuatori (*Figura 12*), test per la valutazione dei limiti di resistenza di giunti o elementi strutturali (*Figura 13*).

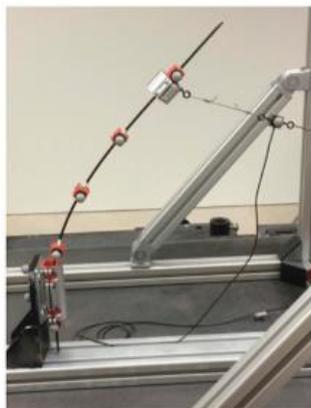


Figura 11 test di resistenza a flessione su banco di un supporto spinale [5]



Figura 12 test su giunto esoscheletrico provvisto di attuttore [5]

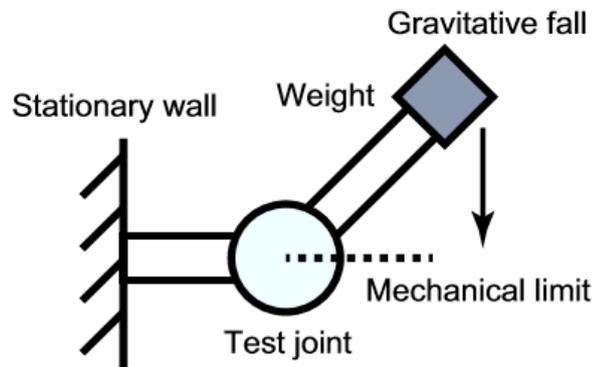
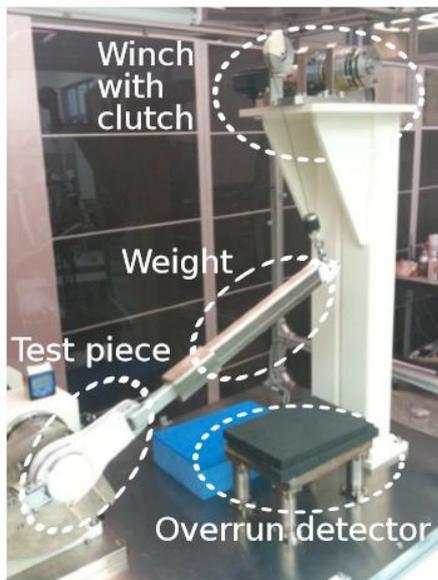


Figura 13 test su banco per la valutazione del limite meccanico di un giunto angolare [7]

Una via di mezzo, tra test su umano e quelli su banco, è realizzata tramite l'uso di manichini (doll) che permettono di replicare le fattezze umane in termini di dimensioni e peso. A titolo di esempio viene riportato (*Figura 14*) uno dei test su di un esoscheletro per il supporto degli arti inferiori durante la camminata: il dispositivo viene fatto indossare ad un manichino, con fattezze e peso umani, e poi testato tramite un banco prova specifico [7].

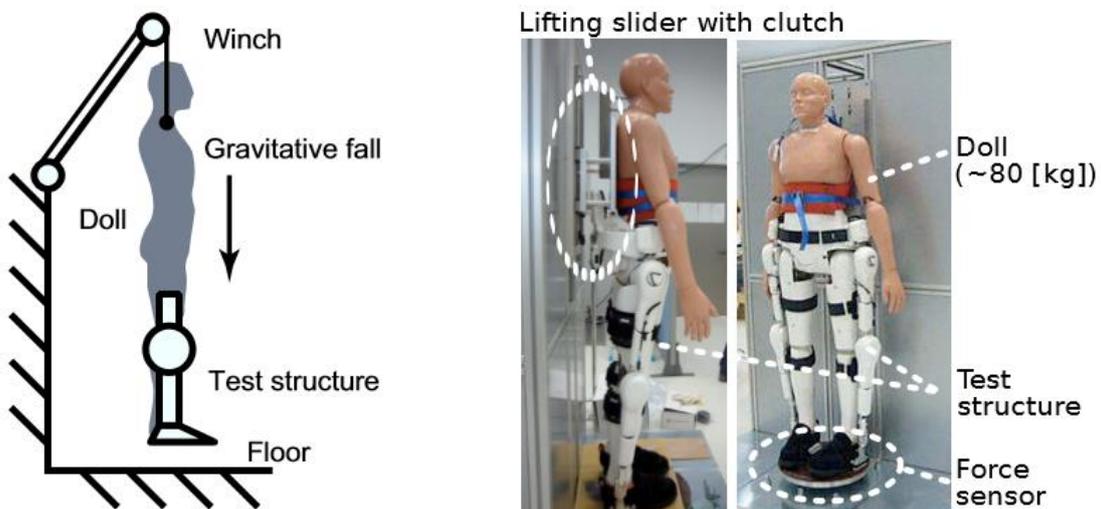


Figura 14 test tramite l'utilizzo di un manichino antropomorfo [7]

1.6 Simulatori per test standard di valutazione delle prestazioni su esoscheletri per il supporto lombare

L'esoscheletro presentato nel seguente elaborato fa parte della categoria dei robot indossabili per il supporto lombare. Normalmente, questo specifico tipo di dispositivi permettono di assistere i movimenti del busto di un operatore durante operazioni manuali che ne determinano la flessione e/o il mantenimento in una posizione per lunghi periodi di tempo.

Durante questi movimenti, la coppia di estensione del tronco da parte dell'operatore genera una forza di compressione sui dischi lombari. Se questa forza arriva a superare la resistenza dei dischi, si ha un danneggiamento che, a lungo andare, è causa di un processo degenerativo dei dischi intervertebrali che determina forti dolori musco scheletrici. I dispositivi per il supporto lombare generano una coppia resistente che va a ridurre lo sforzo muscolare dell'operatore delle articolazioni di anca e tronco e permettono dunque di ridurre dolori e danneggiamenti alla schiena [8].

Oggi l'interesse per questi dispositivi da parte di aziende e consumatori è molto alto, ma, essendo una novità di questo settore, non vi sono ancora delle metodologie standard per quanto riguarda le valutazioni delle performance: ciò comporta l'impossibilità di avere metri di paragone tra dispositivo e dispositivo con un conseguente impatto negativo sul mercato. Occorre dunque identificare quelli che dovranno essere i test standard di valutazione per le performance di robot indossabili per il supporto lombare.

Come riportato nei paragrafi precedenti, esistono ad oggi diverse metodologie per effettuare test su esoscheletri indossabili. Per il caso specifico di questo elaborato, ci si è orientati verso lo studio di un simulatore di persona a banco che avesse caratteristiche e componenti progettati in modo da simulare al meglio forme e movimenti umani. Questa scelta è stata fatta poiché non sono molti i simulatori per questi dispositivi che permettono di effettuare test a banco emulando fattezze e movenze umane: nella maggior parte dei casi, gli studi vengono condotti direttamente su persone oppure vengono usati manichini.

Secondo l'articolo [8], per essere considerati macchinari da test standard però, questo tipo di banchi simulativi richiedono il rispetto di alcuni requisiti:

- La struttura e le misurazioni effettuate tramite essa devono rimanere stabili se soggetti ad eventuali disturbi causati dalla coppia assistiva prodotta all'esoscheletro;
- L'operazione, l'acquisizione dei dati e l'analisi dei dati devono essere facili per l'operatore;
- La dimensione, la forma e la distribuzione del peso degli elementi che simulano le fattezze umane devono rientrare in un range plausibile e legato a valori ottenuti da dati o riferimenti esterni;
- Per valutare le performance, occorre che la struttura effettui movimenti programmati secondo riferimenti voluti dall'operatore, tramite un sistema di attuazione attivo.

1.7 Ergonomia degli esoscheletri ad uso industriale e relative problematiche

Una delle caratteristiche fondamentali che occorre considerare nella progettazione di un dispositivo indossabile, è sicuramente l'ingombro ed il peso del dispositivo stesso: l'ergonomia è un fattore importantissimo così come la scelta del materiale. Gli operatori devono avere possibilità di muoversi con facilità anche vestiti con questi robot, devono essere in grado di indossarli e toglierli semplicemente e non devono arrecare pericolo ad oggetti o persone nell'ambiente in cui operano.

Secondo gli studi condotti presso "University of Applied Sciences Kaiserslautern, geboren te Bad Bergzabern, Duitsland" [15] su esoscheletri per il supporto degli arti, ma che possono anche essere ricondotti ad altre tipologie di esoscheletri, sono state rilevate alcune problematiche, legate all'ergonomia e al design, comuni in varie tipologie di dispositivi:

- Limitazione dell'area di lavoro, dovuta all'ingombro del dispositivo indossato da un operatore;
- Problematiche legate al sistema di movimentazione meccanico, ovvero difficoltà per il dispositivo di garantire la fluidità nei movimenti per l'operatore che si ritrova ad essere vincolato;
- Difficoltà nell'adattamento del dispositivo su corpi differenti, ovvero problemi legati all'indossabilità su soggetti con caratteristiche antropometriche differenti tra loro;
- Scomodità che arreca il dispositivo una volta indossato;
- Portabilità, se il dispositivo possiede grandi masse e inerzie;

Queste problematiche che sono state riscontrate, sono legate a poche ma fondamentali cause, nello specifico [15]:

- Masse eccessive legate ai sistemi di attuazione dei dispositivi: gli attuatori utilizzati devono garantire determinate potenze e prestazioni affinché' il dispositivo possa compiere le funzionalità per cui è stato ideato, ma per raggiungere le prestazioni ricercate occorre utilizzare attuatori con masse e volumi importanti che vanno ad appesantire l'esoscheletro.
- Studi e valutazioni sbagliate della cinematica di arti e giunti umani: la progettazione di un esoscheletro antropomorfo sulla base di studi non approfonditi e scorretti riguardo i cinematismi dei vari giunti e arti umani, possono generare dispositivi scomodi e che causano difficoltà nei movimenti agli operatori che li indossano.
- Non garantire regolazioni antropometriche e, di conseguenza, non permettere l'adattabilità dei dispositivi su diverse tipologie di corpi umani.

Secondo [15], un buon design di un esoscheletro indossabile inizia con la scelta di una struttura cinematica adeguata del dispositivo, cioè la struttura puramente meccanica del dispositivo deve consentire la vestibilità, la facilità d'uso e il comfort per l'operatore già prima che ne venga implementato l'azionamento e il controllo. Dunque, il primo step nel processo di progettazione di un esoscheletro è quello di studiare e fissare un buon modello che descriva la cinematica della regione del corpo umano interessata. Questo modello permetterà quindi di testare, durante le simulazioni, i meccanismi esoscheletrici successivamente progettati, per farli interagire con direttamente con il modello cinematico reale.

1.7.1 Cause dell'incompatibilità cinematica

Pur avendo un modello cinematico adeguato però, è molto difficile, se non impossibile, garantire la perfetta compatibilità cinematica tra un esoscheletro indossabile e l'essere umano, dal momento che i centri di rotazione della struttura anatomica umana non restano fissi durante il movimento (*Figura 15*).

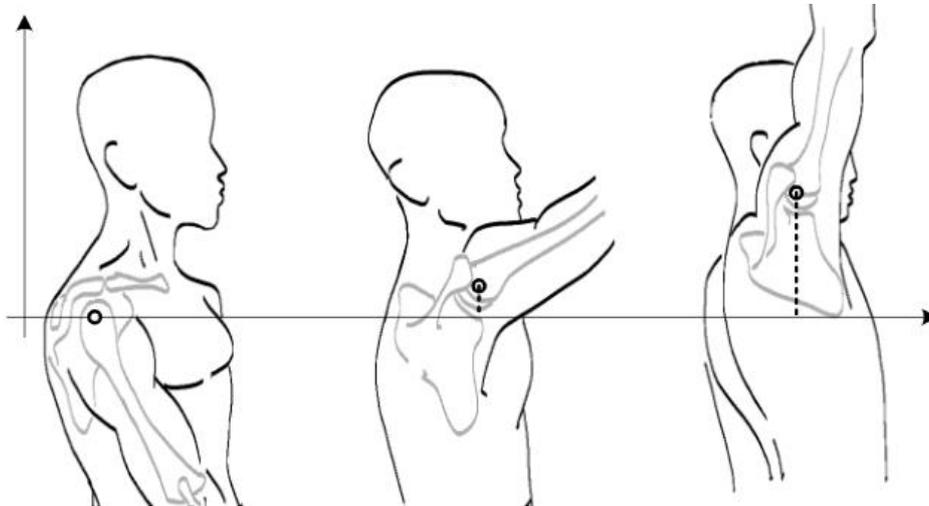


Figura 15 Esempio della traslazione verticale del centro di rotazione dell'articolazione della spalla [15]

Secondo studi condotti [15], le cause di incompatibilità cinematica tra la persona e l'esoscheletro possono essere ricondotte a Micro e Macro-disallineamenti che esistono tra gli assi articolari umani e gli assi articolari del dispositivo.

Si verificano Macro-disallineamenti, se i giunti esoscheletrici per l'interazione con determinati giunti umani, o gruppi di giunti, sono troppo semplificati. La semplificazione eccessiva, in questo caso, significa che i gradi di libertà di un'articolazione esoscheletrica o di un gruppo articolare sono inferiori al numero di gradi di libertà dell'articolazione umana o del gruppo articolare corrispondente.

I Micro-disallineamenti, sono meno evidenti, ma si verificano in tutti i modelli di esoscheletro indossabili e si verificano anche se il numero di gradi di libertà tra l'esoscheletro e le articolazioni umane è corretto; anch'essi sono principalmente causati da assi di rotazione, dell'articolazione del dispositivo e dell'arto umano, non coincidenti tra loro.

I micro e macro-disallineamenti contribuiscono al disagio di un operatore e possono limitare e alterare il naturale movimento di un arto umano all'interno di un esoscheletro. Essendo impossibile garantire i perfetti allineamenti degli assi di rotazione tra dispositivi ed esseri umani, occorre limitarli il più possibile per ridurre al minimo il loro impatto negativo sul confort dell'operatore.

Capitolo 2

Costruzione e assemblaggio dell'Esoscheletro

Il progetto seguito dal candidato riguarda un esoscheletro per uso industriale pensato per il sostegno della persona durante operazioni che richiedono flessione e sosta in posizioni che potrebbero, a lungo andare, causare dolori e problemi muscolo scheletrici. Il dispositivo è stato progettato presso il DIMEAS del Politecnico di Torino durante studi precedenti condotti dall'ex tesista e studente Giuseppe Aloe [9].

Nella fase iniziale del suo lavoro di tesi, il candidato si è occupato di ultimare e revisionare la progettazione delle componenti strutturali mancanti dell'esoscheletro, nello specifico le parti del backframe e del leg-link.

Successivamente si è occupato della ricerca di costruttori che dessero disponibilità per la creazione e assemblaggio dei componenti mancanti in modo tale da poterli mandare in produzione, così da poter, in seguito, procedere con l'assemblaggio.

Il candidato si è poi occupato della progettazione del banco prova per la successiva simulazione e test dell'esoscheletro e della ricerca bibliografica delle metodologie e normative legate ai test che attualmente si effettuano per gli esoscheletri ad uso industriale, così da poter avere le linee guida per, successivamente, effettuare correttamente le prove sul prototipo assemblato.

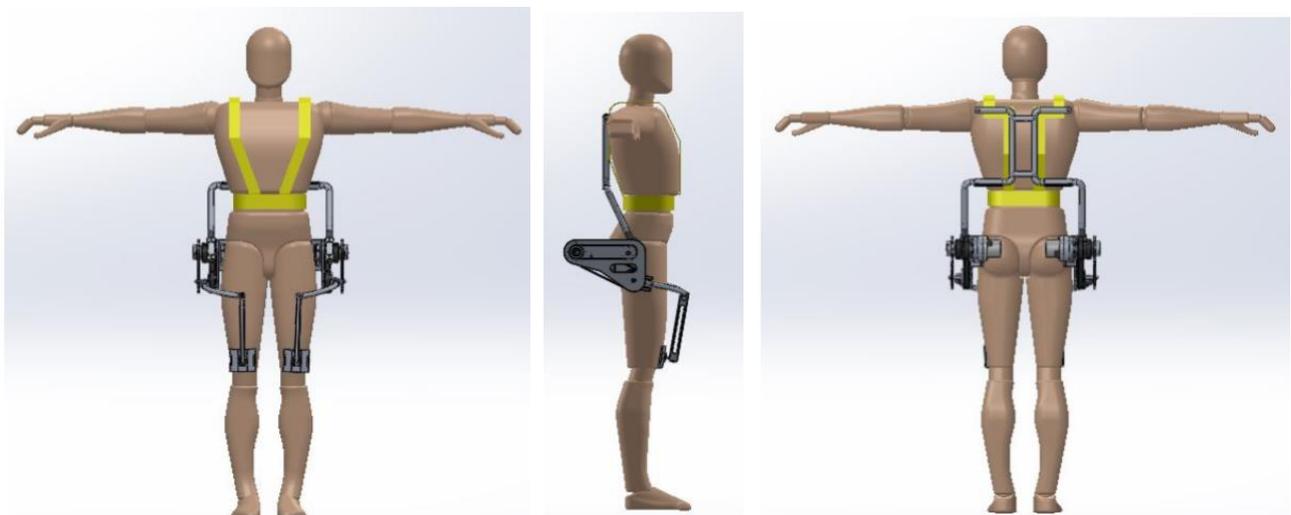


Figura 16 esoscheletro in progetto calzato su di un manichino antropomorfo e provvisto di spallacci per la vestizione [9]

2.1 Descrizione esoscheletro

L'esoscheletro in esame è in grado di sostenere il peso del busto dell'operatore grazie all'azione attiva fornita da due motori pneumatici che trasmettono una coppia, tramite una trasmissione a cinghia, che viene ripartita tra due pulegge collegate alle strutture di supporto principali, ovvero il backframe ed il leg link.

La struttura è dunque suddivisa in tre sottosistemi:

- **Giunto d'anca motorizzato:** è la sede del motore pneumatico, dell'harmonic drive (ossia un particolare dispositivo per la riduzione della velocità angolare e per la moltiplicazione della coppia, impiegato prevalentemente nelle strutture robotiche per garantire un elevato rapporto di riduzione tra motore e giunti) (Figura 18) e del sistema di trasmissione del moto verso i restanti due sottosistemi tramite doppia cinghia dentata; inoltre, esso sarà direttamente collegato all'uomo tramite un opportuno supporto pelvico. (Figure 16 e 17) [9]

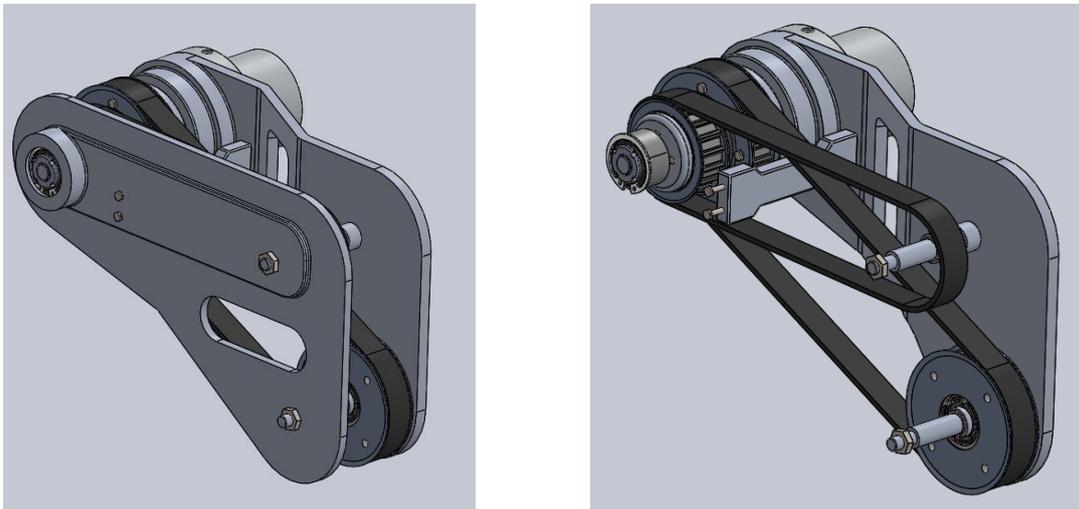


Figura 16 e 17 Giunto d'anca motorizzato con dettaglio della trasmissione a doppia cinghia dentata

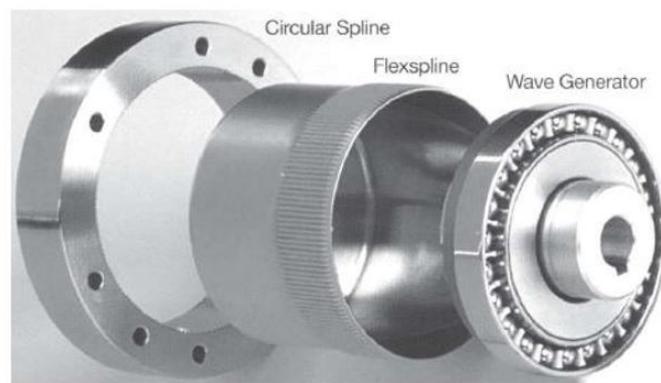


Figura 18 dettaglio dell'harmonic drive [9]

- **Backframe:** una struttura tubolare in alluminio collegata alla schiena dell'operatore tramite un sistema di spallacci; è la struttura che supporta il piegamento del tronco in quanto trasmette la coppia di supporto muscolare all'operatore. Possiede diverse possibilità di regolazioni antropometriche che ne permettono la compatibilità con soggetti di diversa fisionomia: nello specifico è possibile una regolazione in larghezza tramite due profilati telescopici e una in altezza grazie ad un pin filettato (*Figura 19*)



Figura 19 struttura del backframe dell'esoscheletro

- **Leg-link:** è la parte direttamente connessa alle gambe dell'operatore tramite un opportuno cosciale; il suo compito è quello di scaricare sulle gambe la differenza tra la coppia generata dal motore e quella derivante dal backframe. La particolare forma della barra, collegamento tra la struttura del cosciale e la puleggia del giunto d'anca, unita all'ingegnerizzazione dei due giunti alle sue estremità, garantiscono alla gamba dell'operatore una grande libertà di movimento permettendo anche l'abduzione e l'adduzione senza difficoltà. (*Figura 20*)



Figura 20 complessivo del leglink dell'esoscheletro

Il funzionamento del dispositivo prevede un accurato sistema di controllo tramite il quale, una volta letto l'angolo associato al movimento di piegamento o distensione dell'operatore, viene ricavata la coppia necessaria da sviluppare per ridurre l'affaticamento muscolare (in questo caso del 30%), e, dopo il confronto con quella di feedback, viene generato un segnale in tensione per la valvola proporzionale che regola il motore. La coppia così prodotta dall'air motor viene poi opportunamente moltiplicata dal riduttore armonico e riportata, tramite il backframe, alle spalle dell'operatore, mentre la coppia di reazione viene scaricata tramite il leg-link sulla coscia [9].

2.2 Revisione e modifiche prima della produzione

La prima fase del lavoro svolto ha riguardato la revisione e la preparazione dei pezzi mancanti per la successiva messa in produzione e assemblaggio. La maggior parte dei componenti strutturali dei giunti d'anca motorizzati erano già stati prodotti e procurati; ciò che mancava inizialmente erano le strutture tubolari in alluminio del backframe e del leg link (Appendice D).

Il candidato ha revisionato tutti i disegni sia su CAD (SolidWorks) sia su tavole in modo tale da individuare possibili criticità da correggere prima della messa in produzione. Dallo studio preliminare, e grazie alle informazioni tecniche reperite da diversi fornitori e produttori contattati durante la ricerca dei possibili costruttori per i pezzi, sono subito apparse chiare alcune problematiche costruttive riguardo ad alcuni pezzi.

Alcune parti tubolari del backframe presentavano raggi di curvatura eccessivamente piccoli per poter essere realizzati. I tubi in alluminio infatti possono essere piegati senza pericolo di rottura solo per raggi di curvatura pari ad almeno 2,5 volte il raggio esterno del tubo stesso: i profilati del progetto presentavano una curvatura inferiore ad una volta il raggio esterno.

Data quindi l'impossibilità di realizzazione, si è optato per un cambio nella progettazione dei raccordi della struttura, in modo tale da evitare la piegatura. Si è quindi pensato di inserire dei raccordi angolari prodotti a macchina e poi saldati ai tubi rettilinei, tutto realizzato in alluminio. I raccordi presentano lo stesso raggio di curvatura del progetto iniziale: dunque il problema è stato risolto senza modifiche geometriche sul progetto originale. Di seguito viene riportata la modifica effettuata (*Figura 21*).

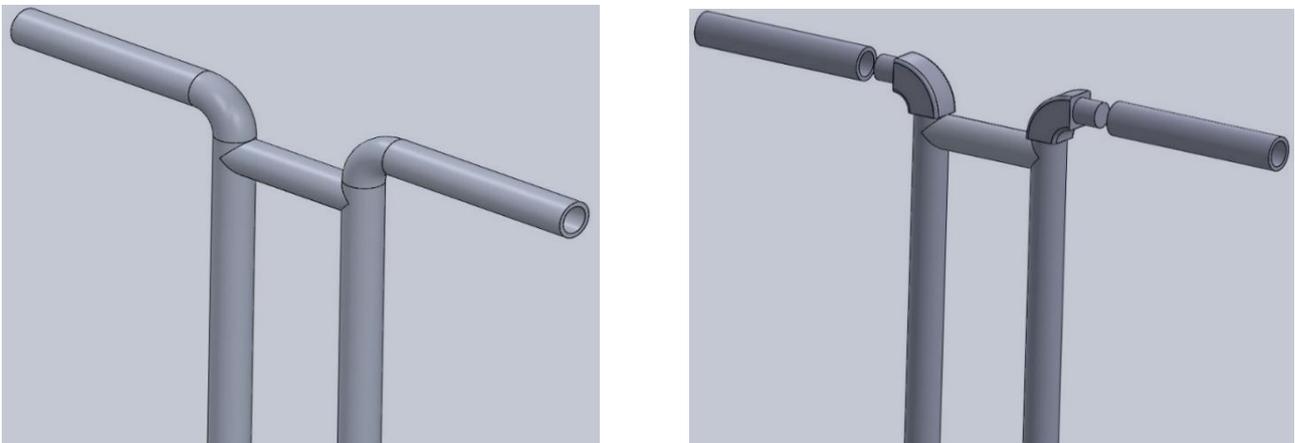


Figura 21 Supporto superiore backframe, si possono notare a sinistra i raccordi con raggio di curvatura eccessivamente piccolo per la loro realizzazione, a destra la soluzione adottata per risolvere questa problematica

Una seconda criticità per la costruzione è stata riscontrata tra le componenti del leg-link. La componente tubolare, che connette la struttura dei cosciali alla puleggia della piastra motorizzata, è risultata avere un diametro interno eccessivamente piccolo per la piegatura (il materiale è sempre alluminio), e quindi si è optato per l'utilizzo di una barra piena invece che un tubo in alluminio, in modo tale da facilitarne la piegatura al raggio di curvatura richiesto. In figura 22 è riportato il componente interessato: come si può notare, nel progetto iniziale si è considerato un tubo cavo (osservabile dalla sezione proposta) sostituito con una barra piena dello stesso diametro esterno.

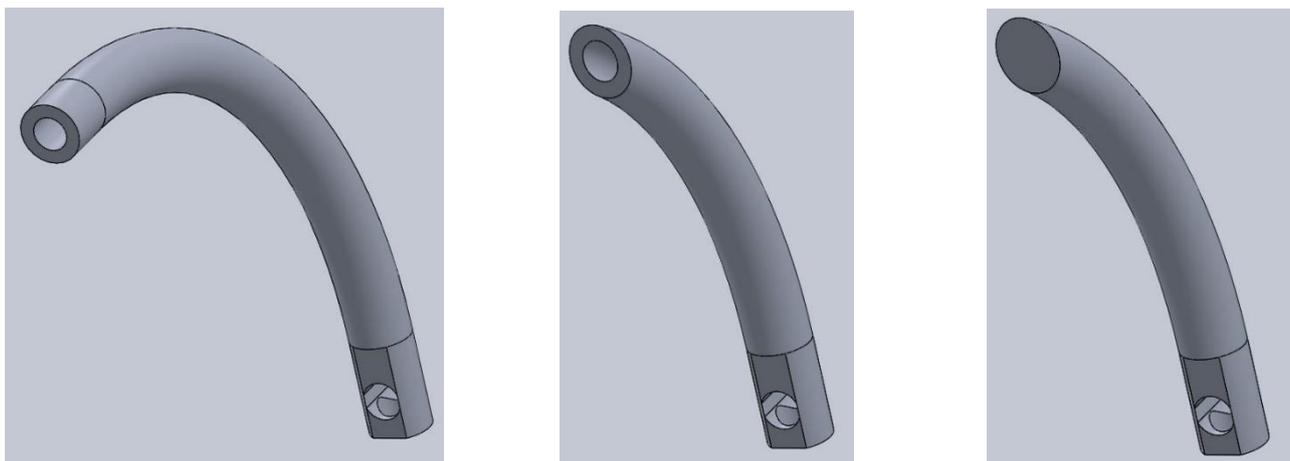


Figura 22 supporto superiore leg-link, si può notare un particolare della sezione, cava nel progetto originale e piena nella successiva modifica per consentirne la realizzazione

2.3 Ricerca costruttori per realizzazione dei pezzi mancanti

Una volta analizzati tutti i componenti ed i disegni delle parti mancanti da mandare in produzione e da assemblare, è iniziata la ricerca dei costruttori adatti per i nostri scopi.

In una prima fase, si sono ricercati i componenti commerciali mancanti per l'assemblaggio delle piastre motorizzate. L'elenco dei componenti ricercati, che si trova in Appendice C, è stato ereditato dal tesista precedente [9] e riesaminato in modo tale da avere maggiore sicurezza.

Il candidato ha effettuato una ricerca mirata contattando diverse aziende fornitrici di componentistica meccanica e ha raccolto tre preventivi per valutare quale fosse il più conveniente dal punto di vista economico.

Una volta inviato l'ordine per i componenti commerciali, ci si è concentrati sulla ricerca di un'azienda per la richiesta di produzione e assemblaggio dei pezzi strutturali mancanti: nello specifico occorre produrre le componenti mancanti di backframe e leglink e, successivamente, effettuare l'assemblaggio tramite saldatura delle intere strutture.

Il candidato ha contattato diversi costruttori ricercando specificatamente nell'aerea piemontese, in modo tale da accorciare le tempistiche di invio e ricezione dei materiali. Sono stati raccolti 10 nominativi ed è stata avviata una gara per la valutazione delle offerte più convenienti e in linea con le scadenze prefissate per la consegna: la ditta Baravalle Sas è risultata la migliore ed è stata dunque accettata la sua offerta. I componenti e le lavorazioni che sono state eseguite dalla ditta sono stati ampiamente descritti e comunicati anche per via telematica: nello specifico, viene riportato uno schema realizzato per assicurare al costruttore una miglior comprensione del lavoro richiesto (Figura 23).

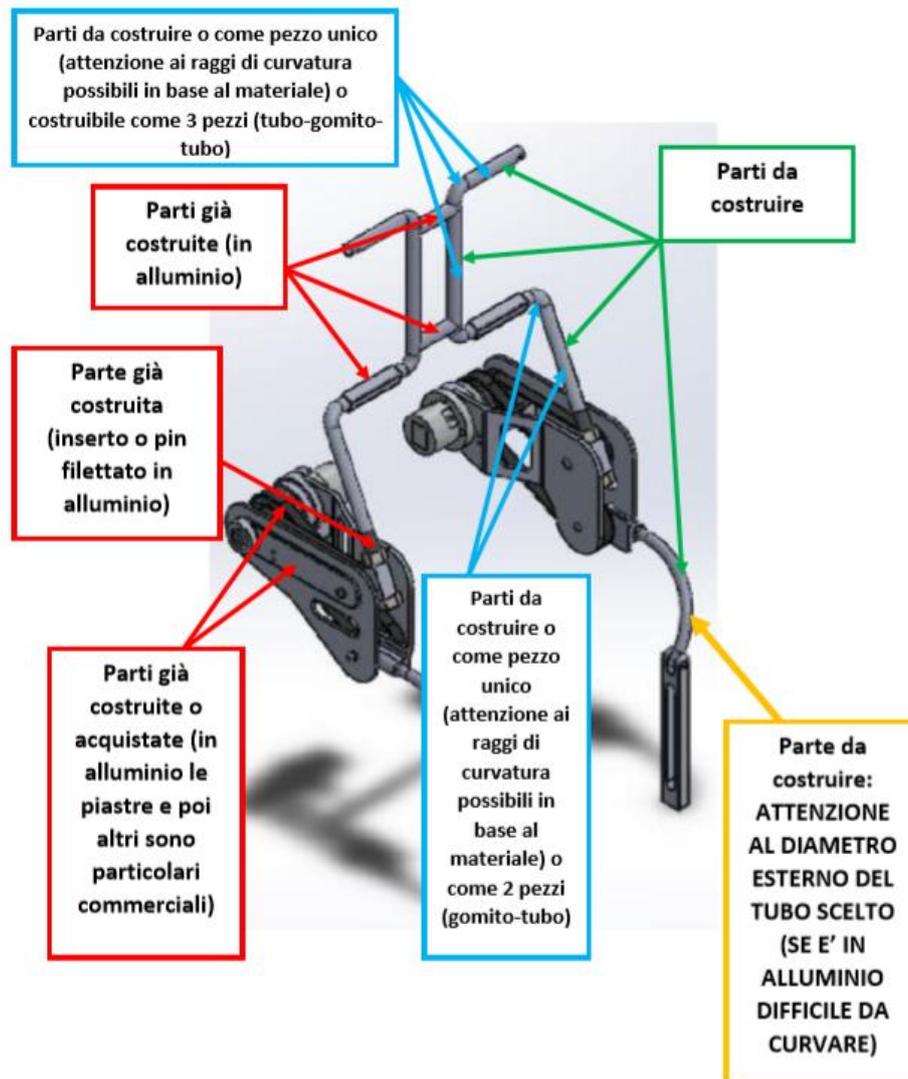


Figura 23 Descrizione specifica delle lavorazioni richieste al costruttore

2.4 Assemblaggio dell'esoscheletro

Una volta terminati e recuperati tutti i componenti mandati in produzione, il candidato si è occupato della ricerca della minuteria necessaria per l'assemblaggio di tutto il sistema. L'elenco recuperato da testi precedenti e revisionato è riportato in Appendice C.

L'assemblaggio dell'esoscheletro ha richiesto non solo il montaggio pezzo per pezzo, ma anche alcune piccole modifiche effettuate tramite lavorazione meccanica in modo tale da garantire l'accoppiamento di alcuni componenti a causa di alcuni difetti e imprecisioni nel materiale e nelle lavorazioni.

Capitolo 3

Progettazione di un banco prova per test su esoscheletri industriali per il supporto dell'operatore

Il candidato si è occupato della progettazione di un banco prova necessario ad effettuare i test sul dispositivo esoscheletrico studiato. Inizialmente tutta la struttura è stata concepita per l'utilizzo con il solo esoscheletro in fase di progettazione, quindi ogni aspetto è stato studiato per la sua funzionalità; in seguito il tesista si è occupato di rendere universalmente utilizzabile la struttura per altri sistemi analoghi nelle funzionalità e nel design.

3.1 Idea iniziale e sviluppo

Il punto di partenza per la progettazione del banco è stato quello di definire quelli che dovranno essere i test necessari per il nostro esoscheletro. Il sistema ha come obiettivo quello di supportare una parte del peso del tronco dell'operatore durante i movimenti di flessione e sosta con busto flesso in avanti (*Figura 24*) che, a lungo andare e con la ripetitività del gesto, possono portare a dolori musco-scheletrici. L'esoscheletro è progettato in modo tale da riuscire a supportare circa il 30% del peso in flessione, mentre il restante 70% sarà supportato dalla muscolatura dell'individuo.

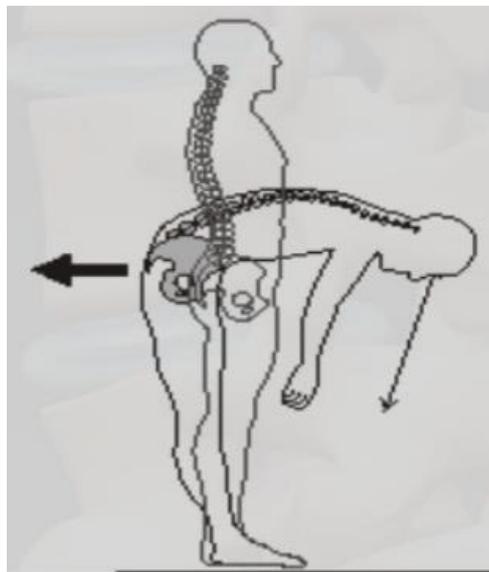


Figura 24 Flessione in avanti e sosta con busto inflesso

Il fulcro dei test dovrà dunque essere lo studio sia dinamico sia statico dell'azione del dispositivo durante la flessione del tronco dell'operatore e la permanenza dello stesso ad un certo angolo di inclinazione.

Partendo da questa base iniziale, si sono studiate quelle che dovranno essere le caratteristiche principali di un ipotetico banco:

1. Si dovrà simulare l'atto della flessione umana il più fedelmente possibile individuando e replicando quelli che sono gli assi di rotazione principali che intervengono nell'atto;
2. Le dimensioni della struttura, sulla quale dovrà essere vestito l'esoscheletro, dovranno essere rappresentative del 95% della popolazione italiana con un'altezza media di 177 cm [11]
3. Occorrerà rispettare le posizioni degli assi di rotazione previsti sull'esoscheletro al fine di evitare strisciamenti relativi tra struttura e dispositivo durante il movimento;
4. Si dovranno emulare le azioni attive della muscolatura umana durante i movimenti studiati;
5. I dati dovranno essere ricavati da sensori posizionati sia sulla struttura e sia sul dispositivo;
6. La struttura dovrà essere stabile e non eccessivamente ingombrante.

Il punto di partenza dunque, è stato quello di creare un prototipo di supporto al quale agganciare l'esoscheletro che avesse dimensioni pari a quelle di un bacino umano e che permettesse ampi movimenti nella parte frontale e inferiore così da non bloccare nessun grado di libertà del sistema.

La prima bozza, e tutti i prototipi successivi, sono stati creati da zero tramite il software SolidWorks Premium 2017.

3.2 Prima bozza del banco prova

L'esoscheletro in progetto presenta diverse regolazioni antropometriche che è possibile utilizzare per permetterne la vestizione su di un numero molto ampio di soggetti di altezze e pesi differenti. Dal momento che non sarebbe possibile effettuare un test per ogni combinazione di caratteristiche, si è optato per standardizzare il tutto sul 95 percentile uomo: tramite coefficienti per il calcolo della lunghezza dei segmenti corporei in funzione dell'altezza totale dell'uomo H [12] (Figura 25), si è calcolata la larghezza dei fianchi e le altre misure necessarie per l'impostazione della struttura.

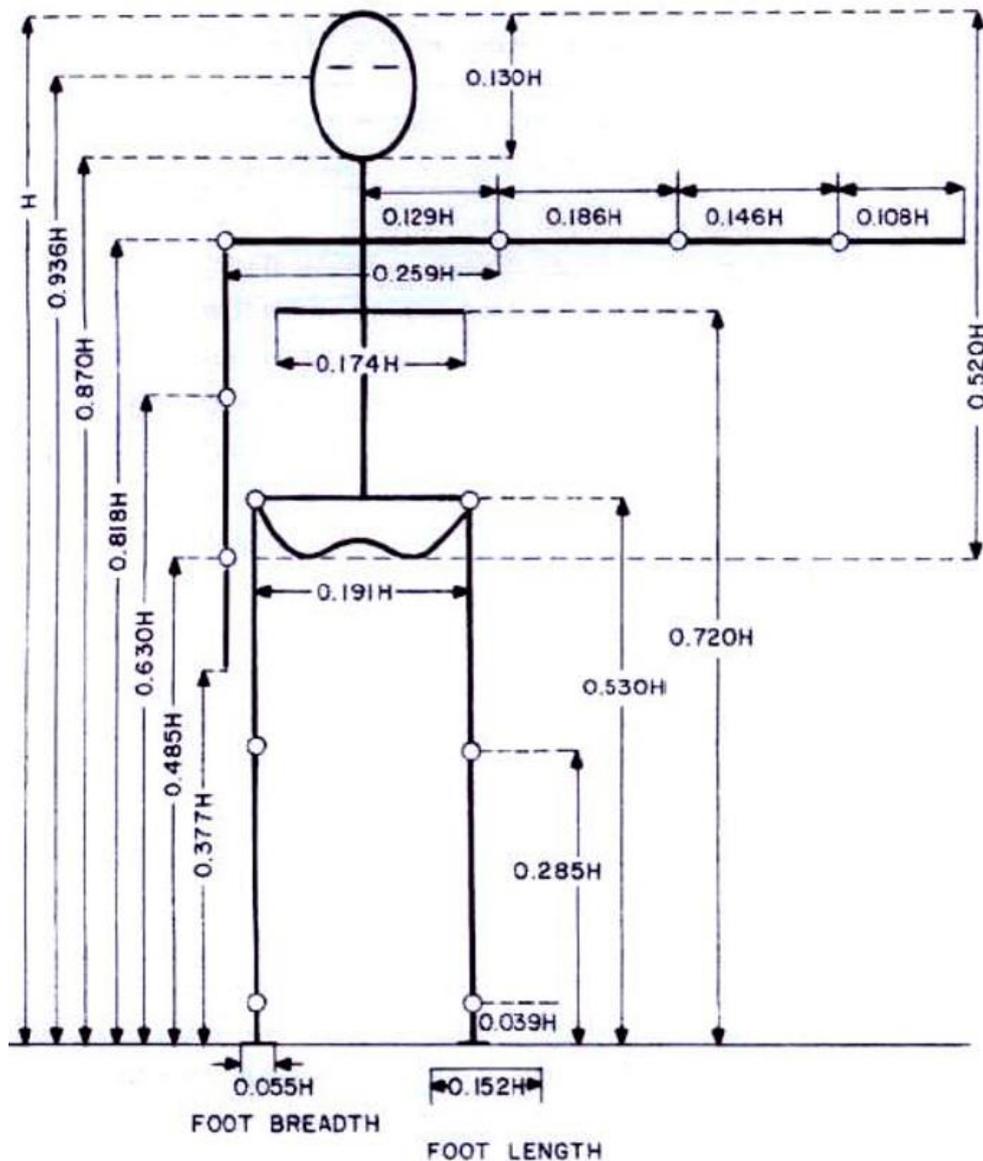


Figura 25 Tabella con i coefficienti per il calcolo delle misure antropometriche

La prima bozza disegnata è riportata in figura 26: si tratta di un supporto statico di dimensioni standard con due piastre laterali alle quali si aggancerebbero le piastre motorizzate dell'esoscheletro. L'idea era molto semplice ma rispettava molte delle caratteristiche ricercate.

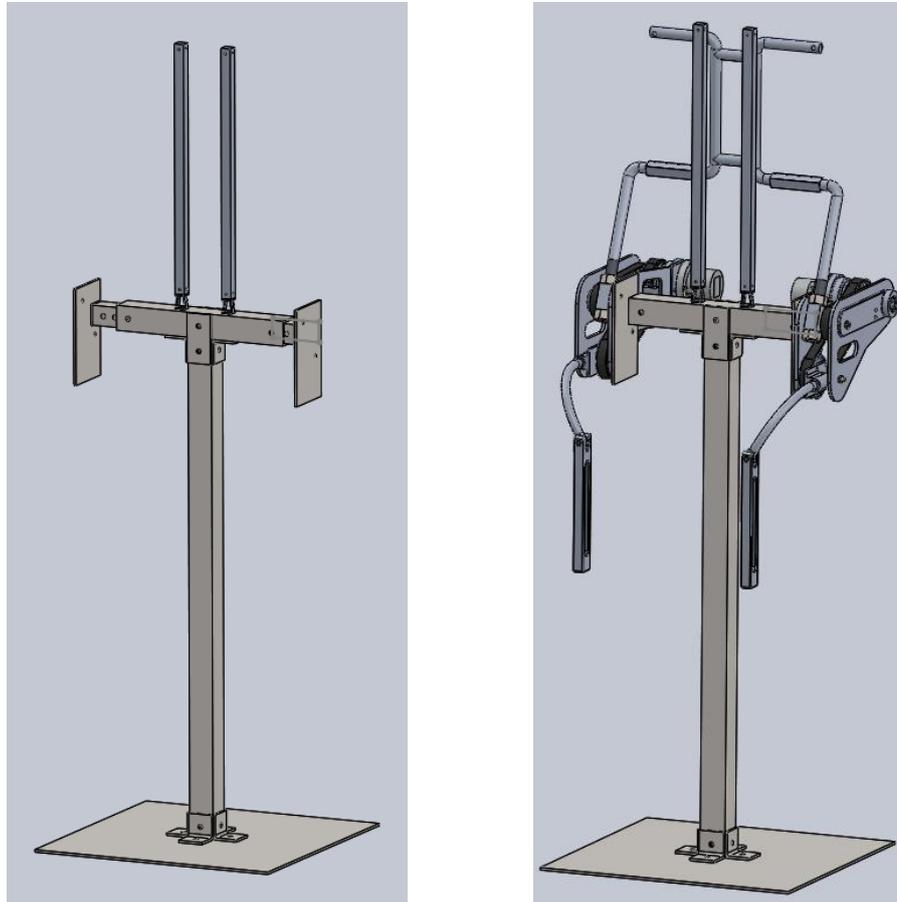


Figura 26 Modello della prima bozza del simulatore di persona

Questo supporto però non avrebbe permesso di simulare in modo ottimale, e soprattutto semplice, la flessione del tronco: l'idea infatti sarebbe stata quella di posizionare una massa concentrata pari alla massa del busto di un adulto medio (come ad esempio uno zaino con dei pesi) sui supporti superiori che, vista la loro connessione alla struttura del bacino tramite cerniere, lasciati flettere in avanti, avrebbero simulato un piegamento a peso morto.

Le problematiche quindi sarebbero state:

1. Assenza di forze resistenti per la simulazione della forza muscolare durante la flessione, l'esoscheletro infatti non avrebbe potuto sostenere il 100% del peso morto in caduta;
2. Complessità e scomodità nella simulazione della massa del tronco;
3. Problematiche strutturali inerenti alla forza peso gravante sulle cerniere;
4. Instabilità della struttura;
5. Componenti non commerciali, il che avrebbe richiesto tempistiche di costruzione molto lunghe.

Sfruttando dunque questa idea iniziale come base di partenza, il candidato ha sviluppato e proposto diverse soluzioni arrivando a definirne due che rispecchiano nella totalità i vincoli che si sono imposti inizialmente. I progetti che verranno presentati di seguito sono stati realizzati sulla base di profilati commerciali standard selezionati da catalogo dell'Azienda di progettazione meccanica Meccania; i data sheet di tutti i componenti sono riportati in Appendice B.

3.3 Prototipo definitivo e sue varianti sulla base dei metodi di simulazione delle forze e dei momenti durante test statici e dinamici

Viene presentato l'iter di sviluppo che ha portato alla modellazione della nuova struttura di base del prototipo del banco prova ideato dal candidato. In seguito, sono poi riportate tre varianti funzionali pensate dal candidato per permettere di effettuare le procedure di test statici e dinamici con un esoscheletro industriale per sostegno del busto durante la flessione.

3.3.1 Struttura di base

Partendo dalla bozza iniziale riportata nel paragrafo precedente, il candidato ha sviluppato il primo prototipo andando come prima cosa a individuare una soluzione più pratica per la costruzione della struttura, cercando di utilizzare il più possibile pezzi commerciali e facilmente reperibili. Dalla ricerca web è stata individuata un'azienda fornitrice di profilati e accessori modulari in alluminio, la Meccania S.r.l.: grazie alla modularità di questi componenti è possibile creare strutture funzionali con molta facilità.

Il candidato ha dunque effettuato uno studio dei cataloghi proposti e, sulla base dei dati dimensionali e di resistenza riportati su di essi, ha individuato i profilati e gli accessori più consoni alle specifiche volute per la progettazione del banco prova (Appendice B).

Sulla base dei dati dimensionali tratti dai cataloghi, il candidato ha modellato su SolidWorks singolarmente tutti i profilati e gli accessori selezionati e, con queste parti, ha progettato e modellato l'assieme della struttura di base del prototipo (*Figura 27*).

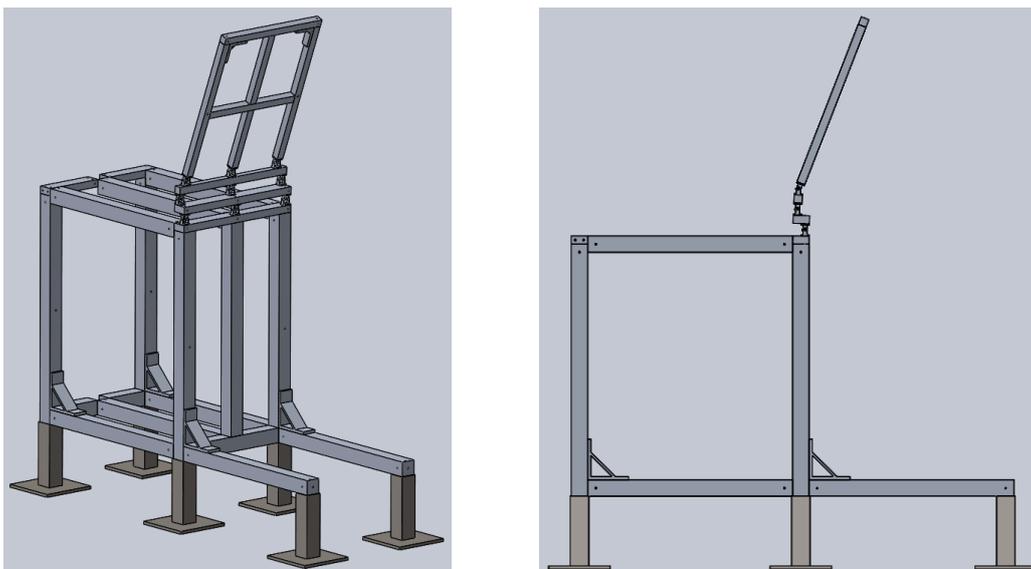


Figura 27 Struttura di base del simulatore

La struttura è caratterizzata da:

- **un supporto centrale:** costituito da una struttura di supporto inferiore sulla quale verrà innestato il sistema per la simulazione dell'effetto resistente passivo delle gambe (*Figura 28*);

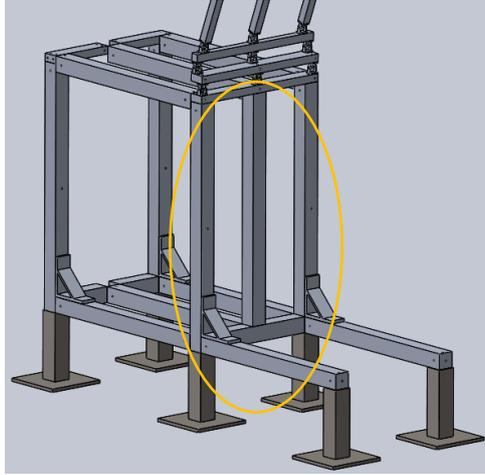


Figura 28 Dettaglio supporto centrale

- **una struttura mobile del bacino:** studiata su base anatomica umana in modo tale da replicare sia le dimensioni e sia gli assi di rotazione principali legati al movimento che si vuole studiare. Lateralmente alla struttura agganciate le piastre motorizzate dell'esoscheletro (*Figure 29 e 30*);

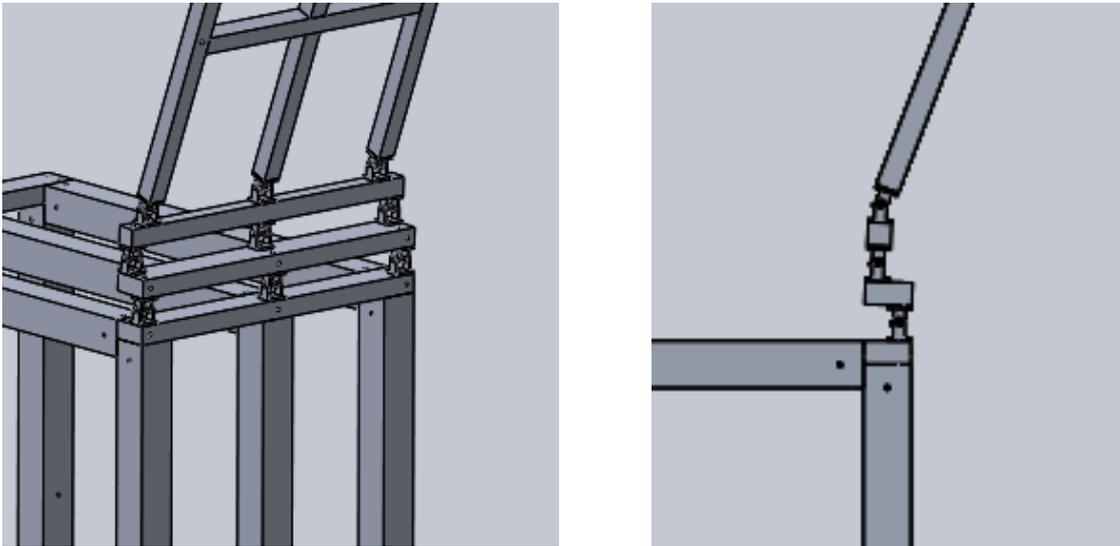


Figura 29 e 30 Dettaglio articolazione del bacino

- **due strutture portanti anteriore e posteriore:** per garantire la stabilità del sistema ed evitare il ribaltamento durante i test a causa dei momenti generati dalle masse e dalle forze in gioco. Come rinforzo sono state inserite anche degli accessori a squadretta nei punti critici (*Figura 31*).

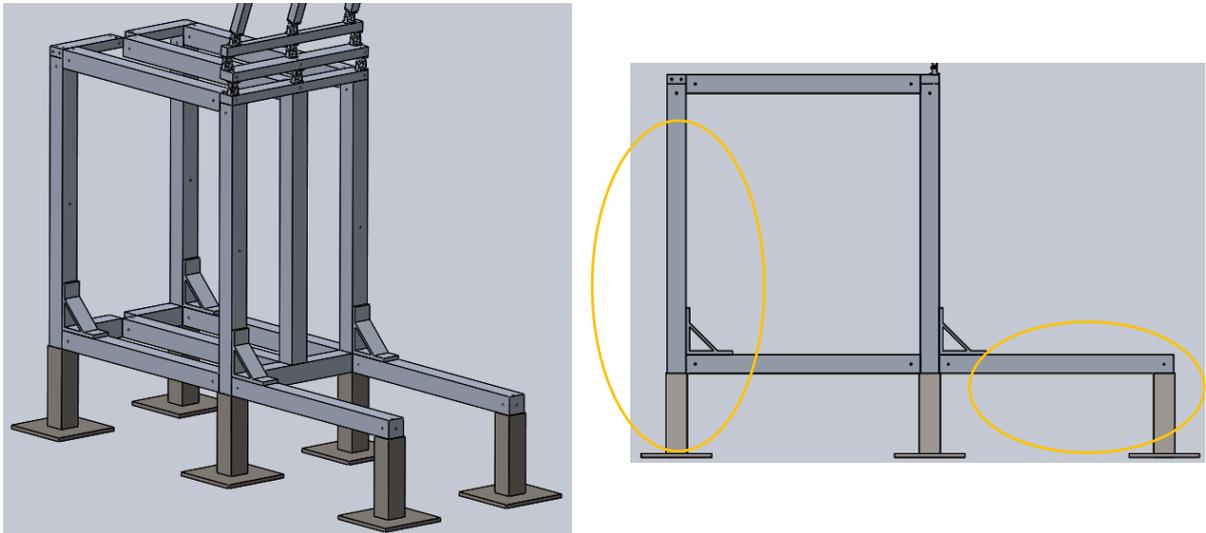


Figura 31 Dettaglio strutture portanti anteriore e posteriore

- **una struttura a portale:** progettata con dimensioni atte ad emulare il tronco umano. È connessa alla struttura del bacino tramite cerniere bloccabili in alluminio e su di essa andranno ad agire forze e coppie durante le simulazioni (*Figure 32 e 33*).

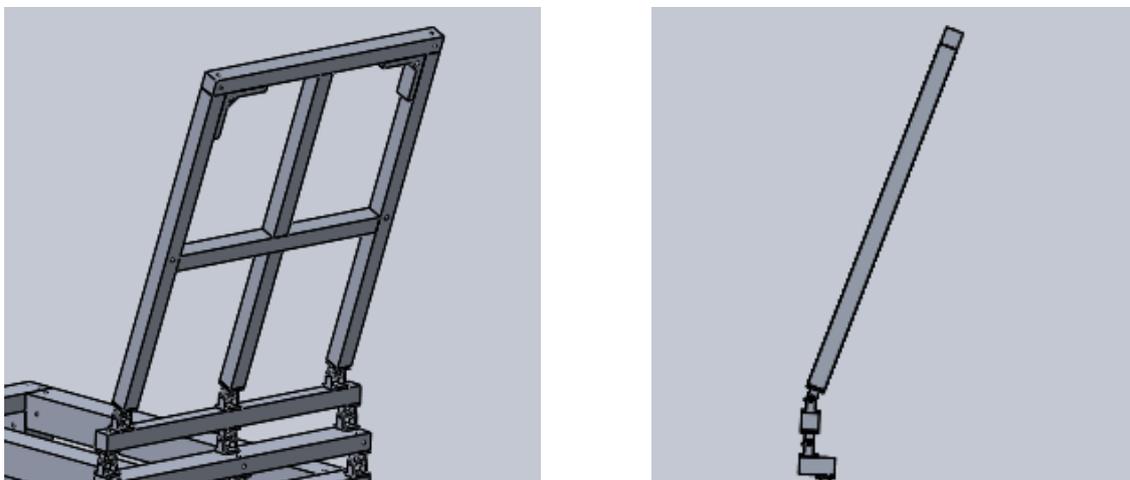


Figura 32 e 33 Dettaglio struttura a portale

Modellata la base del prototipo, il candidato si è occupato di trovare soluzioni per la simulazione delle forze e delle coppie necessarie per i test sul dispositivo esoscheletrico: sono state progettate tre varianti.

3.3.2 Prima soluzione, utilizzo di loop bands e zavorre esterne per test statici e dinamici

La prima soluzione che viene presentata, prevede l'utilizzo di elastici da palestra (LoopBands) (Figure 34 e 35) per la simulazione della forza muscolare resistente durante la flessione e la sosta statica dell'operatore. Si è pensato di utilizzare degli elastici sia per il fatto che sono venduti già calibrati per varie resistenze (figure 1 e 2) sia perché l'utilizzo di un elastico potrebbe (nell'immediato) simulare al meglio la resistenza continua offerta dalla muscolatura nel sorreggere il "peso morto" del busto in flessione.

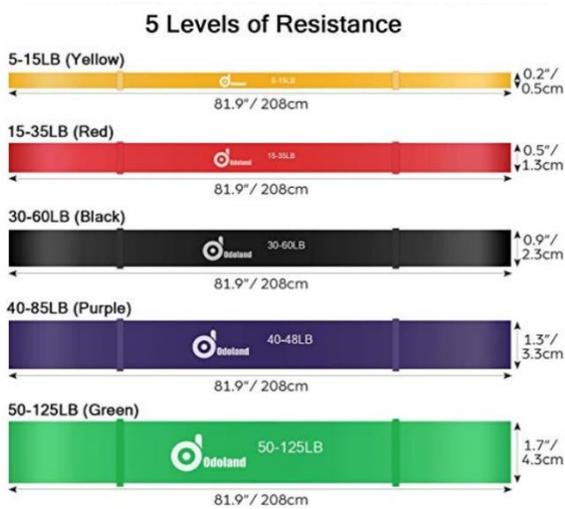


Figura 34 e 35 Loop bands

Per quanto riguarda la simulazione della massa del tronco, si è pensato di utilizzare un gilet zavorrato da pesistica come riportato in figura 36. Il gilet è caricato con sacchetti di sabbia e può essere facilmente indossabile su di una struttura a portale. È stata valutata questa opzione poiché è semplice e simula bene un tronco umano per quanto riguarda la distribuzione di massa e la forma. (Data sheet in Appendice B)



Figura 36 Gilet zavorrato con sacchetti di sabbia

Il gilet zavorrato verrà dunque vestito sul portale della struttura, mentre l'elastico verrà agganciato per una estremità alla struttura del busto in prossimità del baricentro, mentre l'altra estremità verrà agganciata ad una struttura abbastanza rigida da non inflettersi a causa della forza di trazione dell'elastico: per questa esigenza è stato dunque scelto un profilato 40x80 le cui caratteristiche di rigidità flessionale ricavate da catalogo sono riportate in Appendice B (*Figura 37*). Per evitare che la struttura del busto cada all'indietro, a causa del peso, nel momento in cui si trova in posizione verticale, oltre al blocco per la rotazione delle cerniere, è stato inserito un profilato di sostegno sul retro del portale (*Figura 38*).

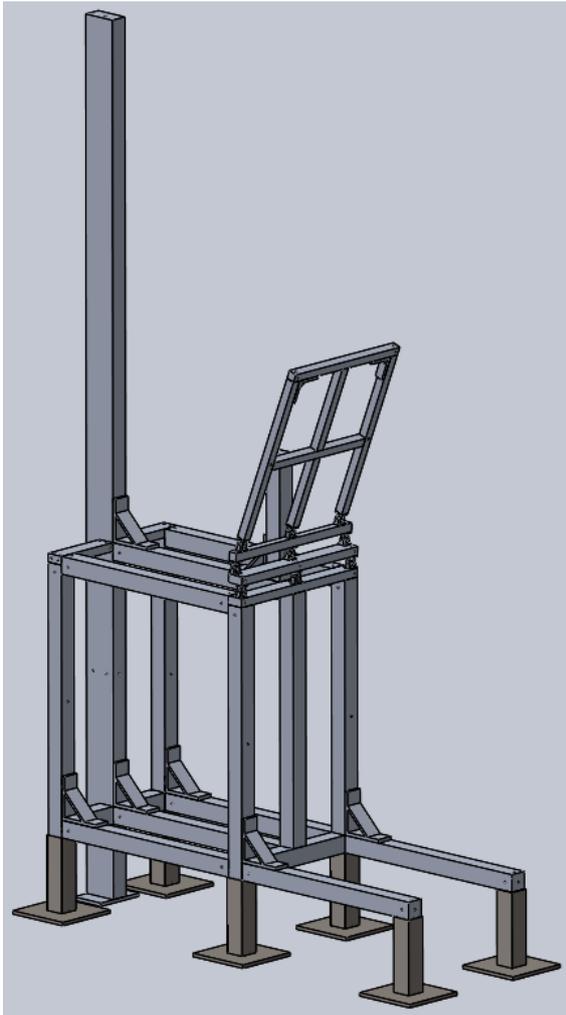


Figura 37 Struttura di base con annesso pilone posteriore per l'aggancio degli elastici

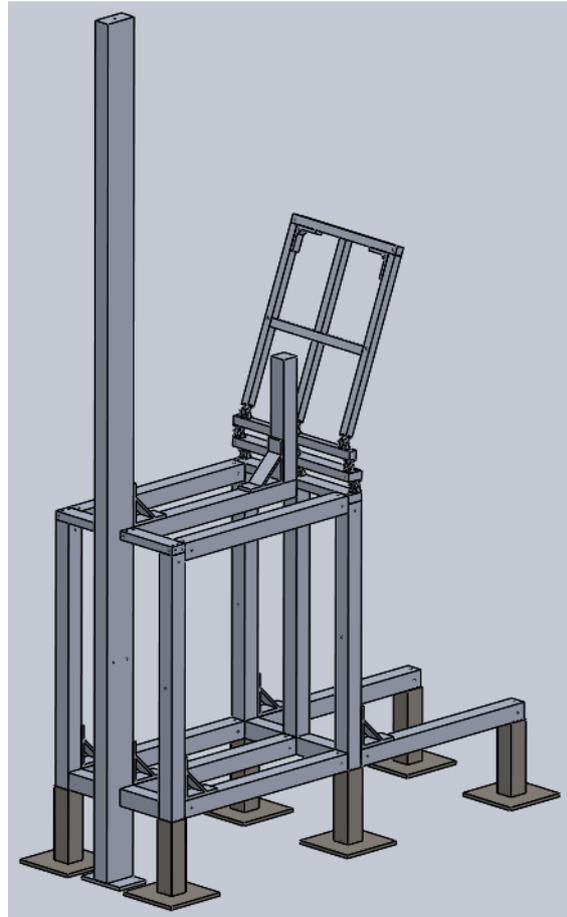


Figura 38 Dettaglio del profilato di sostegno sul retro della struttura del bacino

Su di un foglio Excel sono stati calcolati gli angoli di inclinazione dell'elastico nei due punti di aggancio (angoli α e β nello schema di Figura 39), l'altezza opportuna del profilato portante EO e la forza resistente F_e che dovranno esercitare gli elastici per controbilanciare la quota parte di massa che non è sorretta dall'esoscheletro durante il funzionamento (Appendice A).

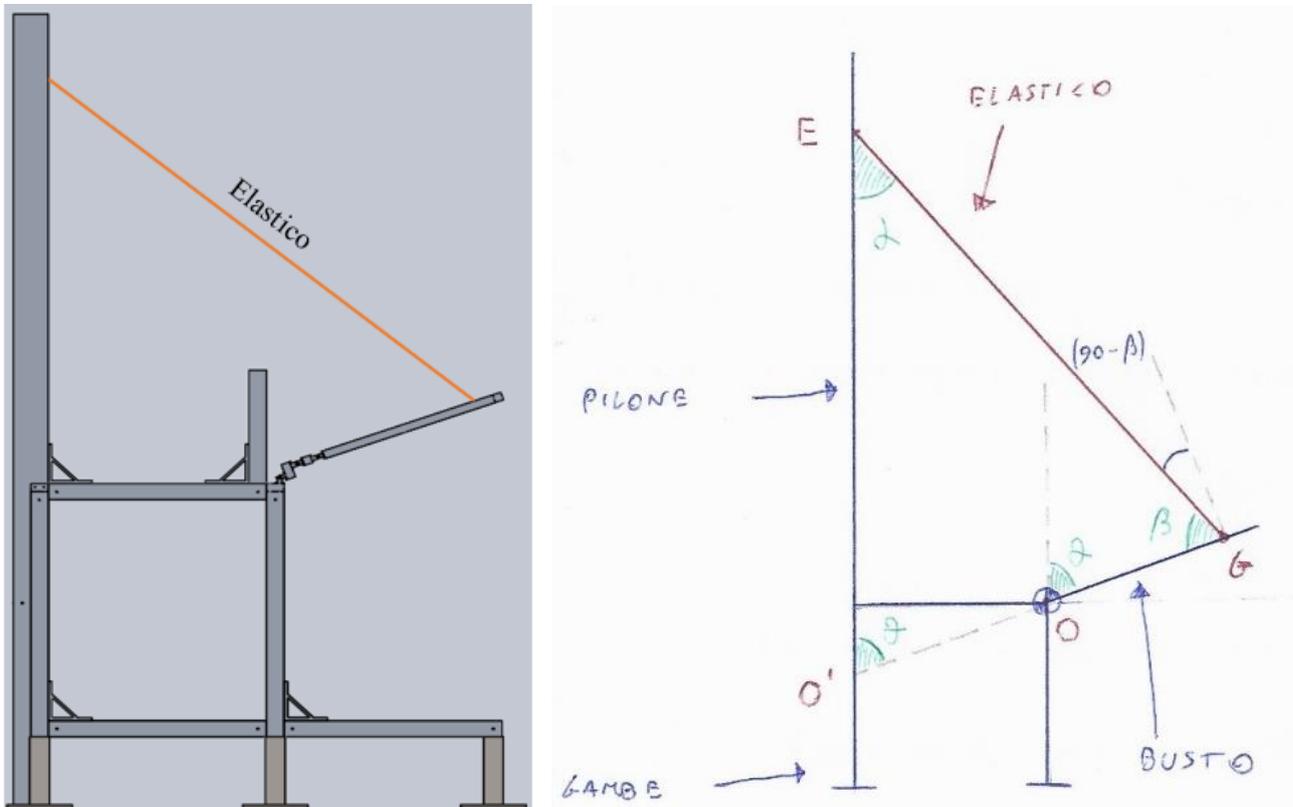


Figura 39 Modello e diagramma della struttura provvista di elastico.

Nello schema in figura identifichiamo:

- Punto G: baricentro della struttura del tronco. È considerato alla stessa di stanza del baricentro sul tronco umano (circa 0,5 m dall'asse dell'anca [9]) e sarà il punto di applicazione della forza F_e resistente dell'elastico.
- Punto E, punto di aggancio dell'elastico sul pilone di sostegno. L'altezza di questo punto di applicazione non è scelta a caso ma è legata agli angoli α e β che determinano il modulo delle componenti di F_e : per evitare di dover utilizzare un elastico con una resistenza eccessivamente elevata, per garantire una specifica componente normale alla struttura del busto, occorre diminuire l'angolo α , e conseguentemente aumentare β , ma ciò è possibile solo innalzando il punto di aggancio E rispetto all'altezza di G.
- Angolo θ : angolo di flessione. In questo caso è posto pari all'angolo massimo, calcolato da studi precedenti, di 70° [9].
- Cerniera O: corrisponde all'asse dell'anca umano.

Il diagramma del corpo libero del sistema (Figura 40) permette di ricavare la forza F_e corrispondente alla forza resistente dell'elastico: nello schema in figura 34 viene analizzata la struttura del busto (in rosso) con un sistema di riferimento con origine sul giunto d'anca O. Facendo l'equilibrio dei momenti intorno alla cerniera O, corrispondente all'asse di rotazione dell'anca, e conoscendo la coppia C_b resistente esercitata dall'esoscheletro, è stata ricavata la coppia muscolare che andrà a sostenere il restante peso del busto durante la flessione in avanti e in seguito, da essa, la forza F_e . La procedura di calcolo è riportata in Appendice A.

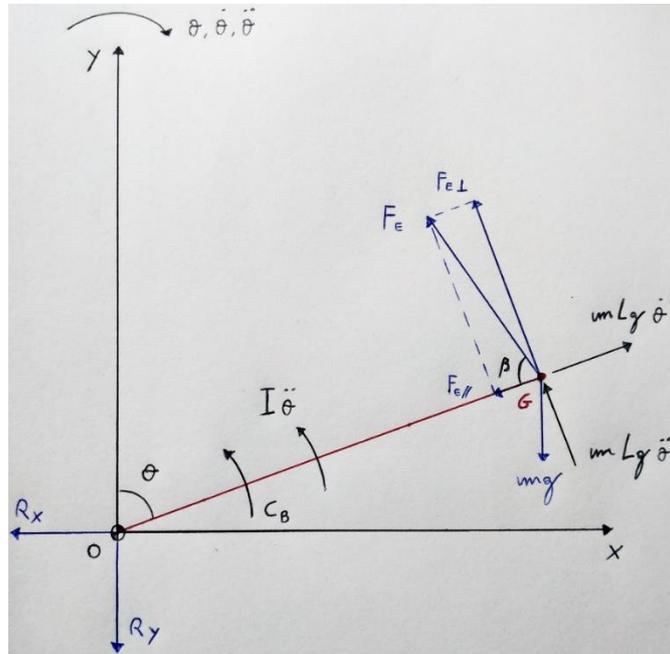


Figura 40 Diagramma del corpo libero della struttura del busto durante il movimento di flessione in avanti

Legenda:

g = baricentro del tronco

O = cerniera dell'anca

$(I + mLg^2)$ = inerzie [Kgm²]

Lg = distanza del baricentro da O [m]

$m = mt + mb$ = massa totale corrispondente alla somma tra la massa della struttura del tronco e quella della struttura del backframe [Kg]

mt = massa della struttura del tronco, considera la massa del gilet zavorrato e la massa dei profilati. È equivalente alla massa vera del tronco umano il cui valore è tratto da studi precedenti [9] [Kg]

mb = massa della struttura del backframe [Kg]

θ = angolo di inclinazione del busto [°]

$\frac{d^2\theta}{dt^2} = 2\pi \sin(2\pi t)$ = accelerazione del tronco in flessione secondo legge cicloidale [rad/s²]

F_e = forza dell'elastico [N]

C_b = coppia del backframe di valore noto (circa 80 Nm) ricavata da studi precedenti [9] [Nm]

I dati noti che sono stati considerati sono stati ricavati dagli studi del precedente tesista [9]; in particolare è nota la coppia Cb dell'esoscheletro nelle condizioni peggiori, ovvero quando il busto si trova in fase di decelerazione durante il movimento di flessione all'angolo massimo theta di 70°. La formula dell'accelerazione utilizzata è stata ricavata considerando che la legge che meglio rappresenta il piegamento del tronco sia una cicloidale [9]. La condizione peggiore quindi si ha durante la fase di decelerazione, poiché in questa fase le forze di inerzia cambiano verso e diventano concordi alla forza peso.

3.3.3 La struttura del bacino

Viene riportato in dettaglio lo studio per la progettazione della struttura di simulazione del bacino.

Dalla ricerca effettuata dal candidato e dall'analisi condotta da studi precedenti [9], si è osservato come il movimento di flessione in avanti del busto di una persona sia legato a due assi di rotazione, uno del giunto dell'anca e uno del giunto lombo sacrale (*Figura 41*, [13], [10]).

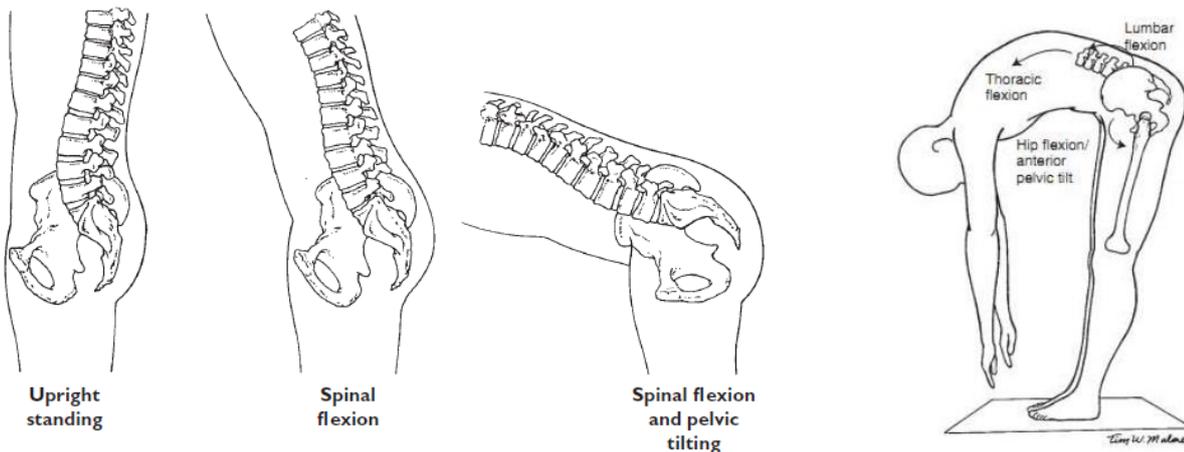


Figura 41 Dettaglio della rotazione del bacino durante la flessione in avanti

L'esoscheletro in studio, progettato dal tesista precedente [9], è caratterizzato dall'aver due giunti di rotazione corrispondenti ai giunti fisici della persona. Le distanze lungo gli assi x e y di un sistema di riferimento sul piano dei giunti sono fisse ed equivalgono alle distanze medie reali tra i giunti fisici della persona. Come si può osservare dalla Figura 42, queste distanze sono state rispettate durante la progettazione delle piastre motorizzate dell'esoscheletro.

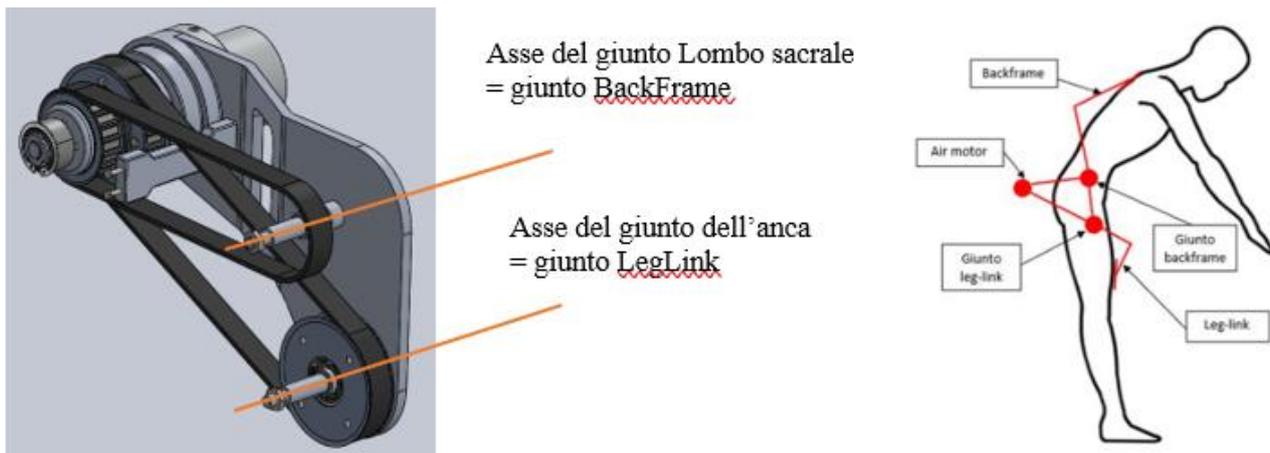


Figura 42 Assi di rotazione della piastra motorizzata dell'esoscheletro

L'idea alla base della progettazione della struttura del bacino parte dunque dalla necessità di mantenere costanti le distanze tra i due assi di rotazione sia per simulare al meglio la dinamica della flessione e sia per evitare strisciamenti relativi durante la rotazione stessa tra l'esoscheletro in studio e la struttura.

Il simulatore del bacino pensato e progettato dal candidato è presentato in Figura 43. Come si può osservare, vi sono tre serie di cerniere bloccabili alla base della struttura: la prima e la terza serie sono poste in corrispondenza dei due assi principali, dell'anca e lombo-sacrale, e sono alla medesima distanza dei due medesimi giunti posti sull'esoscheletro; la fila centrale di cerniere invece è pensata per rimanere bloccata ed è stata inserita principalmente per necessità strutturale.

L'inserimento della terza cerniera infatti non è strettamente necessario: si è dovuta inserire poiché, data la necessità del mantenere inalterate le distanze tra i due assi e dato che tutta la struttura è stata progettata sulla base di profilati e accessori commerciali, non essendo presente da catalogo un profilato con dimensioni pari alla distanza necessaria, il candidato ha optato per le cerniere le cui dimensioni rispettassero il vincolo imposto. Dunque, se si dovesse trovare un profilato, o un'altra soluzione costruttiva in grado di far rispettare il vincolo della distanza tra i due assi, si potrebbe tranquillamente sostituire alle cerniere centrali.

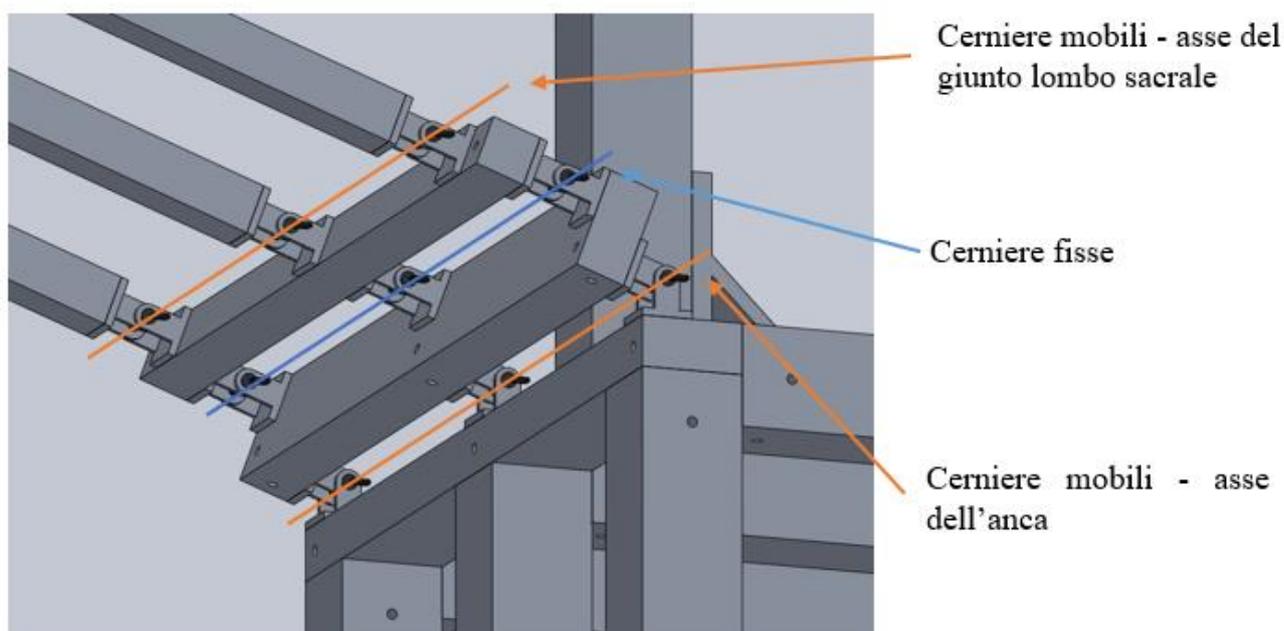


Figura 43 Struttura del bacino, sono evidenziati gli assi di rotazione corrispondenti per ogni fila di cerniere

3.3.4 Montaggio dell'esoscheletro sul simulatore – prima proposta

Il candidato, tramite software SolidWorks, ha potuto testare il montaggio dell'esoscheletro in studio sul simulatore modellato. L'assemblato dell'esoscheletro completo è stato ereditato dagli studi precedenti.

Di seguito sono riportate immagini tratte da SolidWorks raffiguranti il banco prova con installato il dispositivo esoscheletrico (Figura 44). Nella fase di accoppiamento tra la struttura e l'esoscheletro si sono resi coincidenti i due assi principali delle due pulegge del dispositivo con i corrispondenti assi principali sul simulatore, in modo tale da verificare anche che le distanze richieste siano state rispettate. L'unione tra la struttura del bacino e le due piastre motorizzate sarà inoltre garantita da un sistema di aggancio e sgancio rapido, che sarà presumibilmente uguale al sistema che verrà utilizzato per vestire l'esoscheletro alla persona.

Come si può osservare nella Figura 44, l'esoscheletro si innesta perfettamente sulla struttura, senza interferenze. Il backframe dovrà essere agganciato alla struttura del busto e, per farlo, si è pensato all'utilizzo di un sistema di spillacci in tessuto. Nella parte inferiore, in corrispondenza dei cosciali del leg link (zona cerchiata), verrà sviluppato in seguito un sistema per la simulazione della forza resistente passiva della gamba: si è pensato ad un sistema provvisto di molla in grado di restituire un feedback all'esoscheletro simile a quello che restituirebbe la gamba di un operatore, e cioè una resistenza passiva alla coppia scaricata dal leg link.

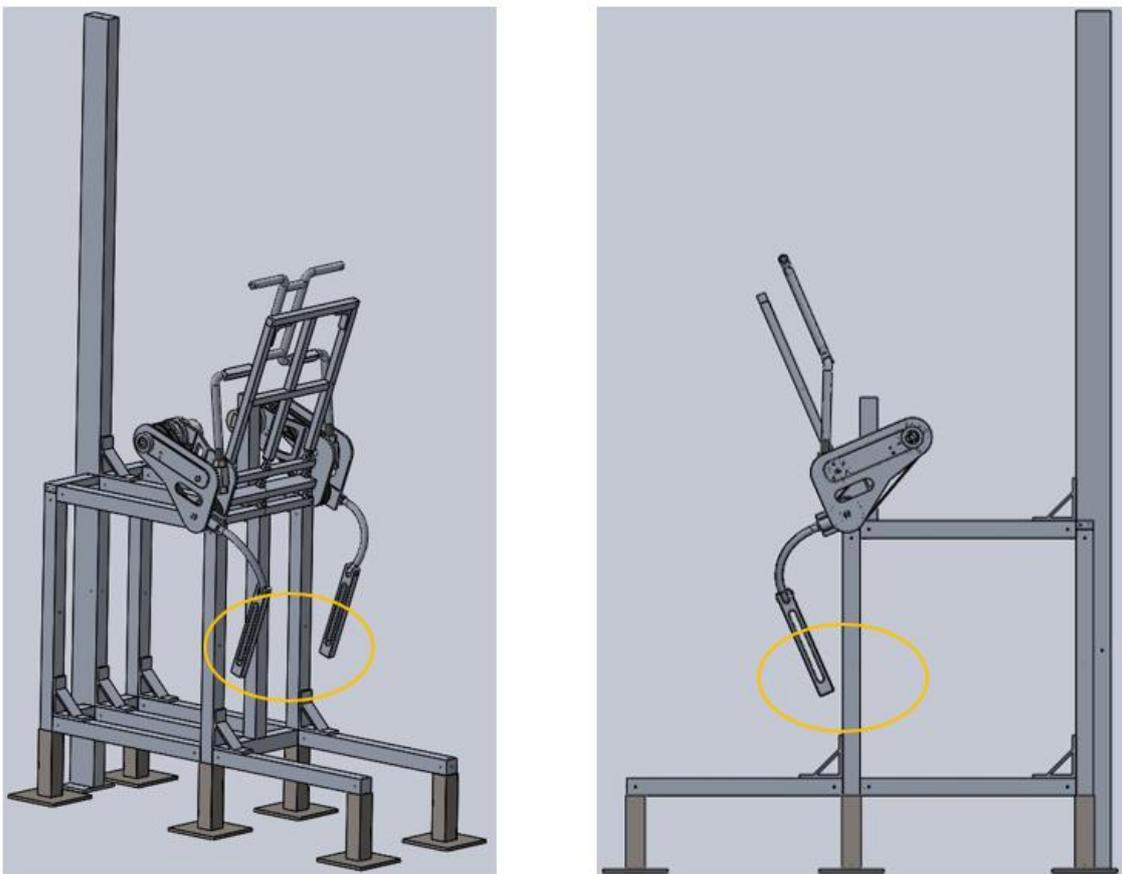


Figura 44 Assieme tra esoscheletro e banco prova

3.3.5 Seconda soluzione, utilizzo di loop bands e pesi sciolti innestati sulla struttura

La seconda variazione proposta per il sistema (*Figura 45*) si differenzia dalla prima solo per la metodologia di simulazione della massa del tronco e, dunque, della forza peso. Vengono mantenute le loop bands per la simulazione della forza muscolare mentre il gilet zavorrato e' stato sostituito con pesi sciolti che verrebbero innestati sulla struttura tramite perni filettati posti in corrispondenza del baricentro fisico del tronco umano (circa a 0,5m dal giunto d'anca).

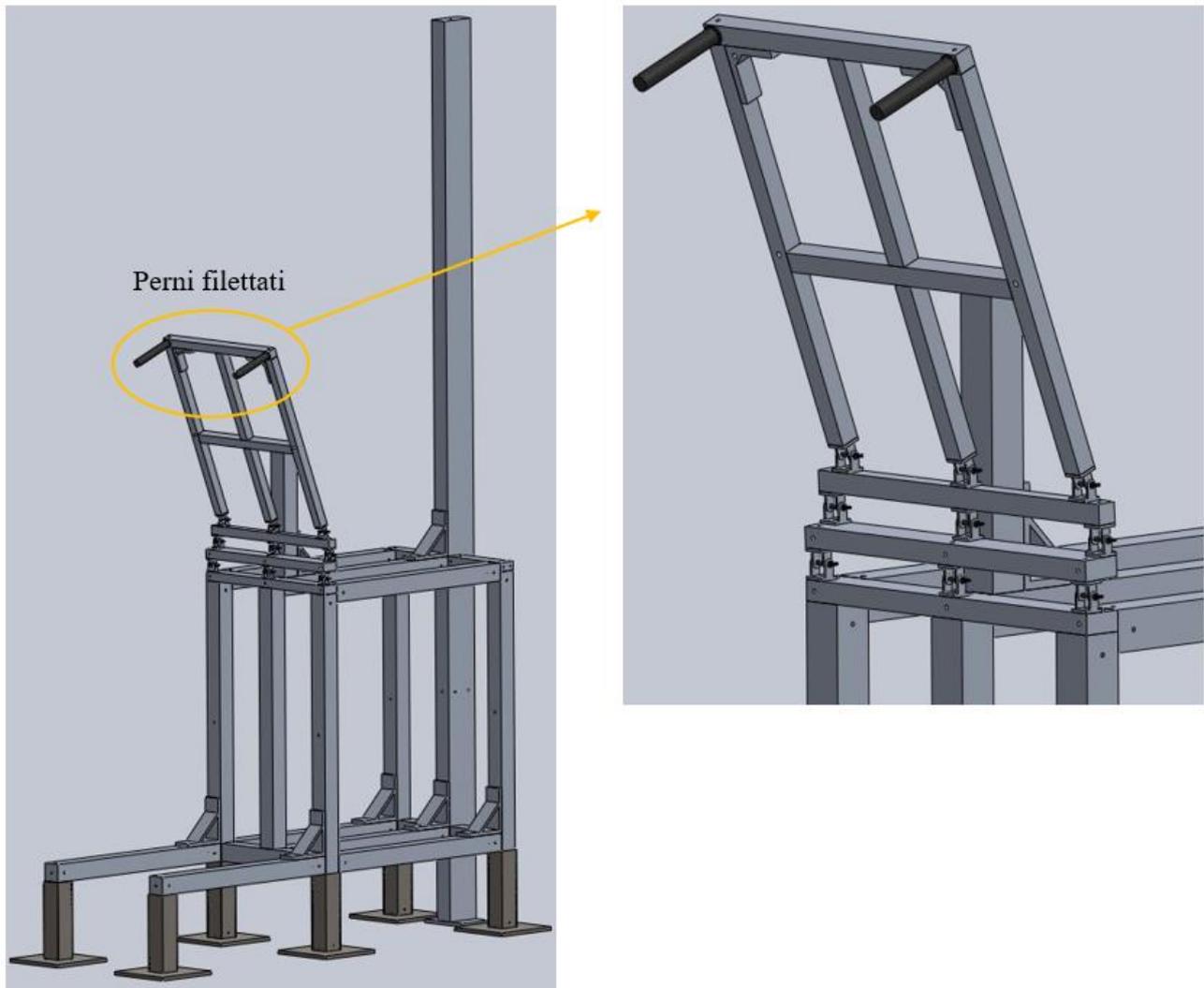


Figura 45 Seconda variazione del simulatore con dettaglio sui perni filettati su cui andranno ad innestarsi i pesi

Lo sviluppo della forma dei pesi da innestare verra' condotto successivamente se dovesse venire convalidata e scelta questa alternativa per il simulatore di persona. In questa fase preliminare e' stata sviluppata solamente la bozza prototipale.

3.3.6 Pro e contro delle prime due proposte per il simulatore di persona

Riporto di seguito una lista di quelli che il candidato ha rilevato essere i pro ed i contro delle prime due proposte presentate per la realizzazione di un banco prova per test su esoscheletri industriali per il sostegno busto.

PRO

- Si utilizzerebbero elementi facilmente reperibili in commercio e ciò potrebbe accelerare il processo di ricerca e assemblaggio di tutto il sistema;
- L'utilizzo di pesi/zavorre e di elastici permetterebbe di poter eseguire i test nell'immediato, ovvero non appena la struttura sarebbe costruita;
- Si avrebbe una simulazione il più vicina possibile a quella reale e naturale di un corpo umano per lo studio statico dal momento che le zavorre emulerebbero bene il peso morto del busto in flessione e gli elastici la forza muscolare resistente;

CONTRO

- La struttura risulterebbe ingombrante e abbastanza antiestetica per la presenza del pilone per l'aggancio degli elastici;
- Vi sarebbero problemi derivanti dal carico sulla struttura: tutte le componenti, da dati forniti dal costruttore e da catalogo, resisterebbero al carico (le cerniere possono infatti reggere fino a 1300 N di carico normale all'asse delle viti, con peso a sbalzo, e ne sono presenti 3 a reggere un carico di circa 600N) ma evitare l'uso di carichi esterni potrebbe sia semplificare le azioni di disassemblaggio e spostamento, sia evitare qualsiasi tipo di problema strutturale non programmato;
- Vi sarebbero grandi difficoltà per il futuro studio dinamico: gli elastici infatti possono fornire un'azione resistente ottimale con struttura ferma;

3.3.7 Terza soluzione, utilizzo di due attuatori pneumatici lineari per la simulazione delle forze di spinta e di quelle resistenti

La terza proposta che viene esposta dal candidato, si differenzia dalle prime due nella le modalità di simulazione sia della forza peso dovuta alla massa del tronco umano, sia della forza muscolare resistente durante la flessione che andrà a lavorare assieme con l'azione dell'esoscheletro. Come si può osservare nelle Figure 46 e 47 riportate di seguito, la struttura di base è rimasta la stessa ma non vi è più il pilone per l'aggancio degli elastici. Questo rende la struttura molto più compatta e meno ingombrante.

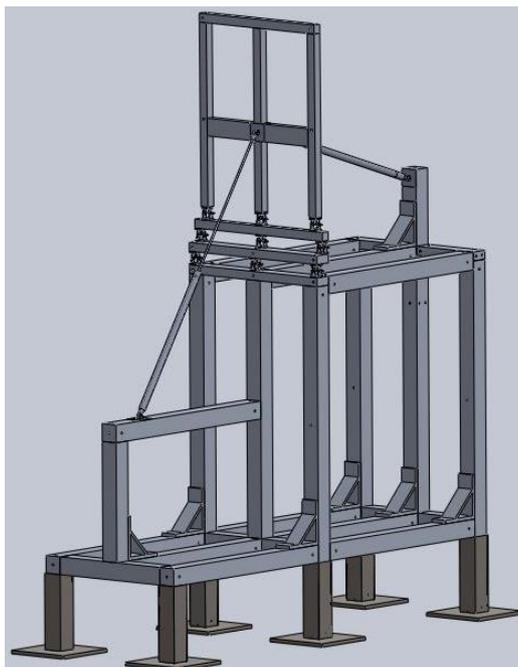


Figura 46 Terza variante del banco prova in fase di progetto

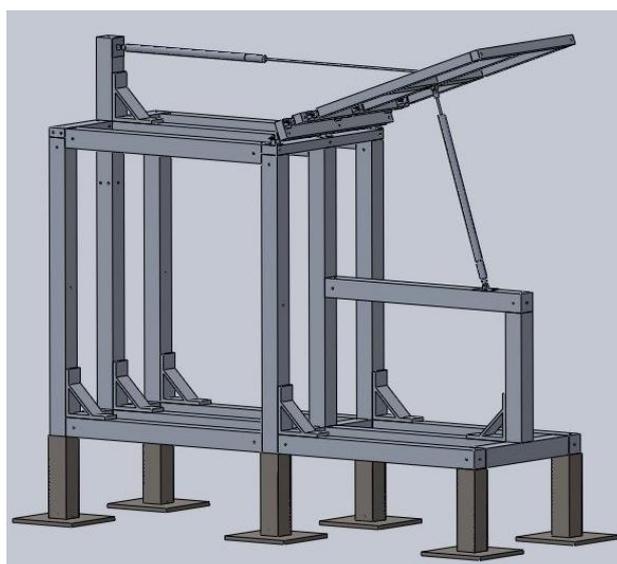


Figura 47 Struttura a portale del busto inclinata a 70°, angolo di flessione massimo

Si è pensato di introdurre due attuatori pneumatici lineari a doppio effetto:

- Uno posteriormente alla struttura del tronco: andrebbe a sostituire l'azione delle zavorre per la simulazione della forza peso applicando una forza F_{A2} in spinta, durante la flessione in avanti (*Figura 48*), con una componente, normale al piano frontale della struttura a portale, che andrebbe a generare una coppia pari alla coppia generata dal peso del tronco umano durante lo stesso movimento di flessione. Durante la fase di risalita dopo flessione (*Figura 49*) inoltre, questo attuttore aiuterebbe il sistema lavorando al contrario, applicando cioè una forza F_{A2} di trazione sulla struttura.
- Uno anteriormente alla struttura del tronco: andrebbe a sostituire l'azione degli elastici per la simulazione della forza F_{A1} (*Figura 48*), e relativa coppia muscolare resistente, durante la flessione in avanti, applicando una forza frenante progressiva contro la struttura a portale. Durante la fase di risalita dopo flessione (*Figura 49*) inoltre, questo attuttore aiuterebbe il sistema lavorando al contrario, applicando cioè una forza F_{A1} di spinta contro la struttura a portale.

Il punto di applicazione P delle due forze è stato posto nel punto medio della struttura a portale, in corrispondenza del suo baricentro.

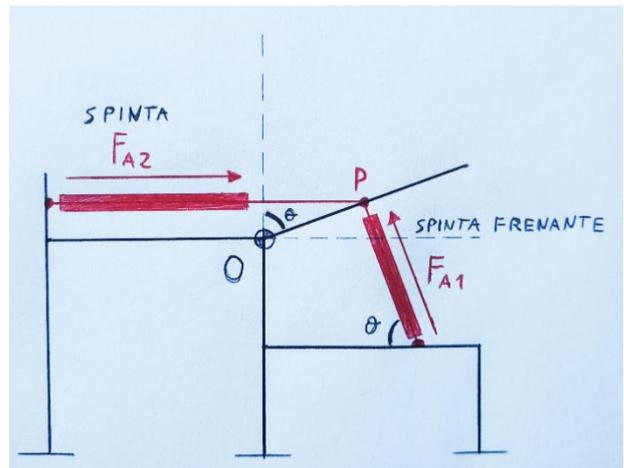
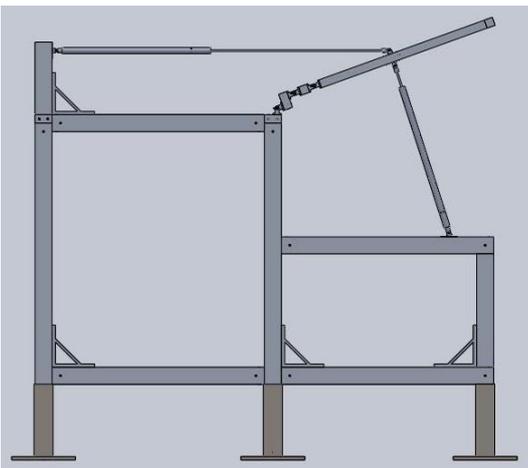


Figura 48 Busto in fase di flessione in avanti e relativo schema per la visualizzazione delle forze

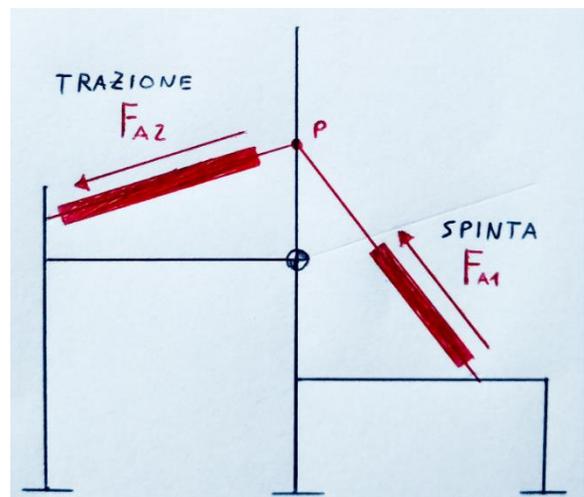
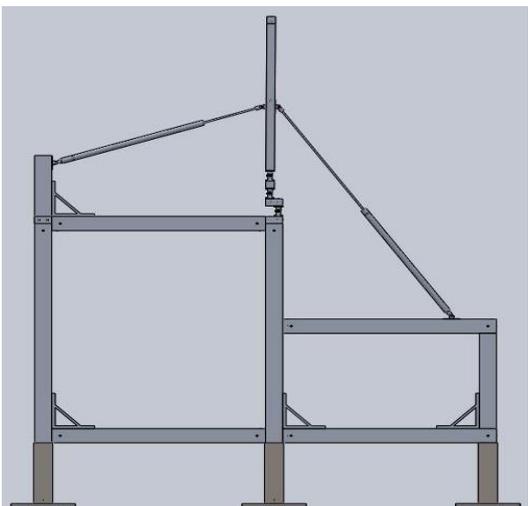


Figura 49 Busto in fase di risalita e relativo schema per la visualizzazione delle forze

Viene riportato di seguito il diagramma del corpo libero del sistema (*Figura 50*): nello schema in figura 50 viene analizzata la struttura del busto (in rosso) con un sistema di riferimento con origine sul giunto d'anca O. Si è scelto di studiare il sistema posizionato nella condizione limite, ovvero alla massima flessione (θ di 70°), e dunque, considerando la forza resistente F_{A1} perpendicolare alla struttura inflessa così da sfruttare interamente la spinta fornita, si è posizionato l'attuatore frontale con un angolo pari a quello massimo di piegamento rispetto all'orizzontale (uguale a θ).

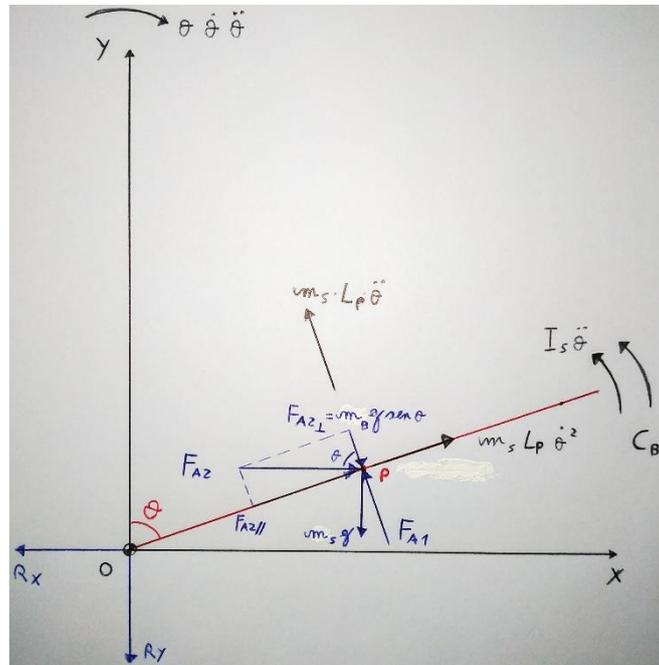


Figura 50 Diagramma del corpo libero per la terza variante del simulatore di persona

Legenda:

p = baricentro della struttura a portale e punto di applicazione delle forze; è posto a metà dell'altezza della struttura a portale del busto.

O = cerniera dell'anca

$(I_s + m_s Lg^2)$ = inerzie relative alle masse di struttura a portale e backframe [Kgm²]

Lp = distanza del punto p da O [m]

$m_s = m_p + m_{bf}$ = massa totale corrispondente alla somma tra la massa della struttura a portale del tronco e quella della struttura del backframe [Kg]

m_b = massa del tronco della persona necessaria per il calcolo della componente F_{A2} perpendicolare [Kg]

θ = angolo di inclinazione del busto [°]

$\frac{d^2\theta}{dt^2} = 2\pi\sin(2\pi t)$ = accelerazione del tronco in flessione secondo legge cicloidale [rad/s²]

F_{A1} = forza generata dall'attuatore lineare frontale [N]

F_{A2} = forza generata dall'attuatore lineare frontale [N]

C_b = coppia del backframe di valore noto (circa 80 Nm) ricavata da studi precedenti [9] [Nm]

Le inerzie considerate si riferiscono al baricentro della struttura a portale; infatti, non essendoci più una massa fisica, come nel caso della presenza delle zavorre, le uniche masse in gioco sono quelle dei profilati commerciali utilizzati per la costruzione e del backframe dell'esoscheletro. Essendo i profilati tutti delle barre quadrate ed essendo il portale un rettangolo simmetrico rispetto all'orizzontale e alla verticale, si è considerato, per geometria, il baricentro posto nel punto medio P considerato equivalente anche al baricentro della struttura del backframe la quale è ugualmente simmetrica e con massa molto piccola rispetto alla struttura a portale.

La forza F_{a2} dell'attuatore posteriore dovrà avere una componente F_{a2} normale al piano del portale che riesca a generare la stessa coppia che verrebbe generata dalla forza peso del tronco della persona durante la flessione: per questo motivo la componente perpendicolare dovrà essere pari alla componente perpendicolare di m_b , ovvero la massa del busto reale.

Le relazioni per il calcolo delle coppie generate dalle forze e i valori dei dati noti sono riportati in Appendice A.

3.3.8 Montaggio dell'esoscheletro sul simulatore – terza proposta

Come nel caso della prima proposta, anche per questa terza variante viene riportato l'assemblato dell'esoscheletro montato sul simulatore (*Figura 51*). Come si può osservare, l'esoscheletro si innesta perfettamente sul banco prova e non vi sono interferenze con i due attuatori né nella parte posteriore né in quella anteriore.

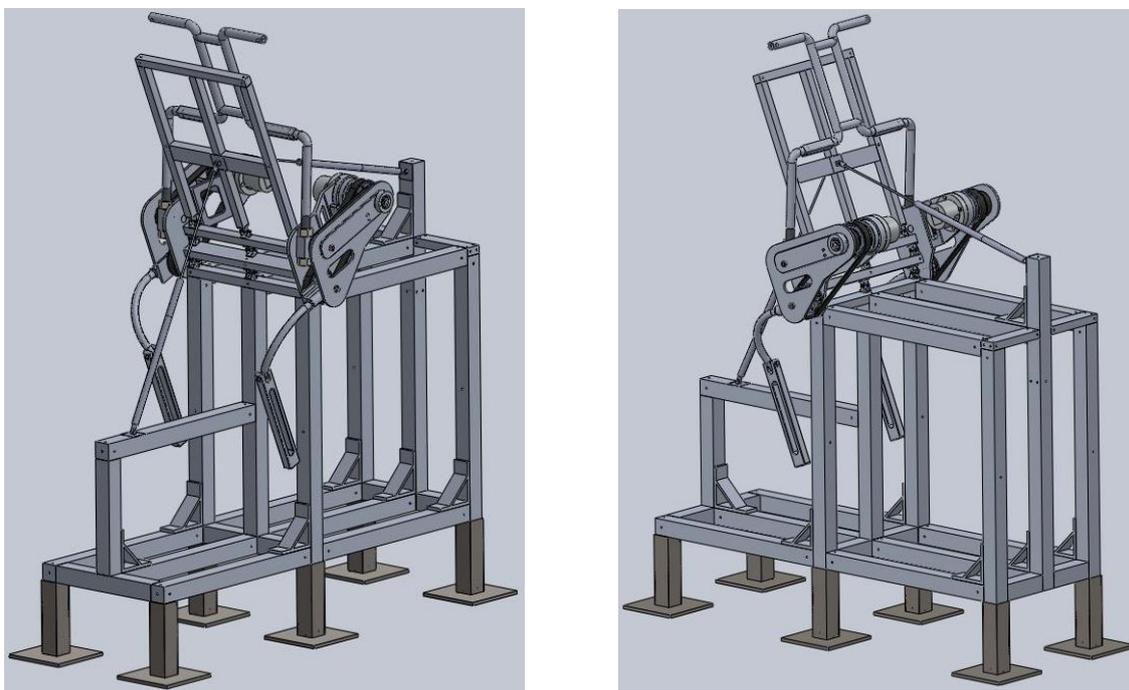


Figura 51 Montaggio dell'esoscheletro sulla terza variante del banco prova, vista anteriore e posteriore

3.3.9 Considerazioni sulla terza proposta del simulatore della persona

La variante del banco prova esposta in questa sezione potrebbe anche essere implementata nella prima proposta sostituendo gli elastici posteriori con l'attuatore frontale: verrebbero quindi mantenute le zavorre per la simulazione del peso ma si avrebbe una struttura più compatta senza necessità di inserire il pilone di aggancio per gli elastici.

Tutto ciò verrà accompagnato da un sistema di controllo e di valvole opportuni, in modo tale da consentire la gestione degli attuatori e da avere controllo completo sui valori di forze e spinte, necessari per i test con l'esoscheletro, portando un notevole beneficio per i test dinamici oltre che per quelli statici.

Come si è potuto notare dai modelli presentati, la struttura di base risulta identica a quella della prima proposta, ma sarebbe possibile ridurla di dimensioni in termini di lunghezza (anche se in lunghezza occuperebbe poco più di un metro, mentre in larghezza meno di 0,5 m). L'assenza del pilone posteriore inoltre la rende più compatta.

3.3.10 Vantaggi della terza proposta per il simulatore di persona

Viene riportata di seguito una lista di quelli che sono stati individuati come vantaggi che si avrebbero nella scelta della terza variante, rispetto alle prime due, del banco prova per la simulazione della persona:

- Diminuirebbero gli ingombri della struttura; si ha infatti una struttura molto più bassa e dunque più compatta, con la possibilità di una ulteriore riduzione in larghezza;
- Si ha l'assenza di carichi esterni che potrebbero generare problemi strutturali e logistici;
- Si avrebbe la possibilità di un maggior controllo sulle forze applicate; tramite un buon sistema di controllo si potrebbero gestire con molta precisione i valori dei carichi applicati durante i test;
- Si avrebbe una grande agevolazione nello studio dinamico oltre che in quello statico;
- Si riuscirebbero ad effettuare eventuali modifiche della struttura senza stravolgimenti nella funzionalità.

3.4 Studio del montaggio di una diversa tipologia di esoscheletro per il sostegno busto sul simulatore della persona

L'obiettivo finale della progettazione è quello di rendere il simulatore universale, quindi adatto ai test su diverse tipologie di esoscheletri industriali per il sostegno del busto. Lo studio e la modellazione iniziale del banco prova si è basata principalmente sul modello di esoscheletro studiato dal candidato e presentato in questo elaborato.

Una volta individuata la struttura prototipale definitiva del simulatore, il candidato ha effettuato e studiato il montaggio su SolidWorks di un altro esoscheletro sempre in studio nei laboratori del DIMEAS del Politecnico di Torino, in modo tale da individuare le criticità, derivanti dall'assemblaggio di un dispositivo diverso da quello originario, ed effettuare modifiche e miglioramenti in grado di rendere universale il sistema per i test.

In Figura 52 è riportato il complessivo estratto da SolidWorks. L'esoscheletro selezionato è sempre un esoscheletro industriale per il sostegno del busto, ma si differenzia da quello studiato per la presenza di un solo giunto di rotazione coincidente col giunto d'anca; inoltre varia anche il sistema di movimentazione e il sistema di trasmissione del moto al backframe. Il dispositivo è stato progettato per un lavoro di tesi presso i laboratori del DIMEAS del Politecnico di Torino [14].

L'esoscheletro, grazie alle numerose regolazioni antropometriche disponibili, è stato regolato in modo tale da garantire le dimensioni standard per il 95 percentile uomo.

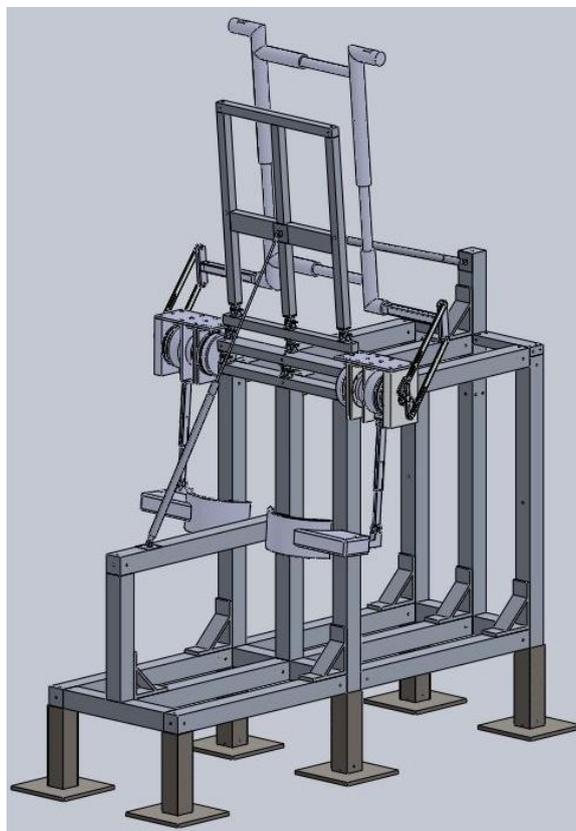


Figura 52 Montaggio di un modello differente di esoscheletro per il sostegno busto sopra il simulatore di persona in fase di progetto

3.4.1 Criticità rilevate nell'insieme e possibili soluzioni

Dall'analisi dell'assemblato, sono state rilevate alcune criticità che sono evidenziate nelle Figure 47 e 48. Come si può osservare, l'esoscheletro si innesta bene sulla struttura a livello del bacino, gli assi dell'anca sono stati fatti coincidere, e non vi sono problemi in questa zona.

Osservando invece la zona posteriore, si osserva come l'attuatore attraversi la struttura del backframe (Figura 53). Questo problema non andrebbe in realtà a creare problemi per i test, poiché durante la flessione non si ha comunque interferenza tra esoscheletro e attuatore; le problematiche potrebbero però insorgere durante il montaggio e smontaggio del dispositivo sul banco prova, poiché, durante queste fasi, si dovrebbe necessariamente disassemblare l'attuatore oppure direttamente il backframe.

Per risolvere questa criticità, si potrebbe cambiare il punto di applicazione degli attuatori sul portale del busto oppure identificare un metodo per un facile smontaggio della struttura durante le fasi di assemblaggio.

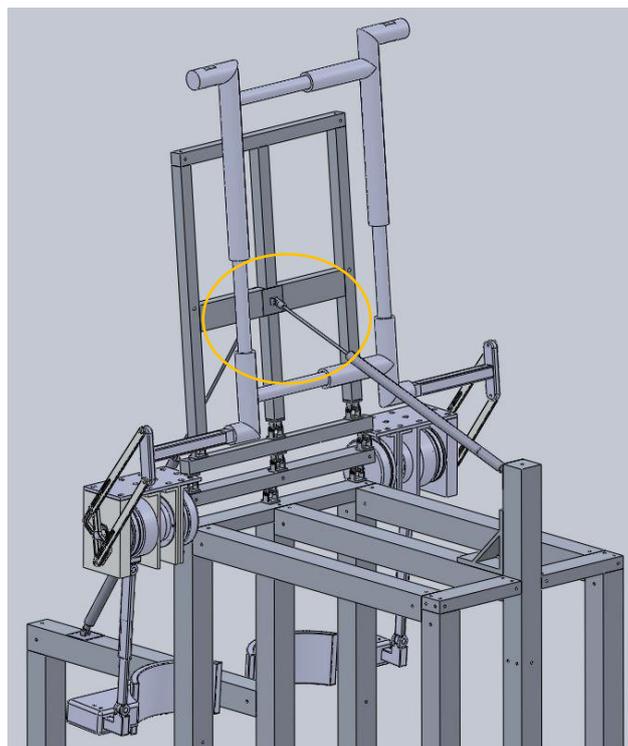


Figura 53 Dettaglio sulla parte posteriore del complessivo: si può notare la criticità dovuta alla compenetrazione tra l'attuatore e la struttura del backframe (zona cerchiata)

La seconda criticita' individuata si ha nella zona del leg link; in particolare, come si puo' notare in Figura 54, i cosciali dell'esoscheletro risultano essere molto vicini alla struttura, e questo potrebbe generare interferenze durante il movimento del leg link stesso.

Per risolvere questa problematica, potrebbe essere opportuno modificare la posizione del profilato che potrebbe interferire con il dispositivo.

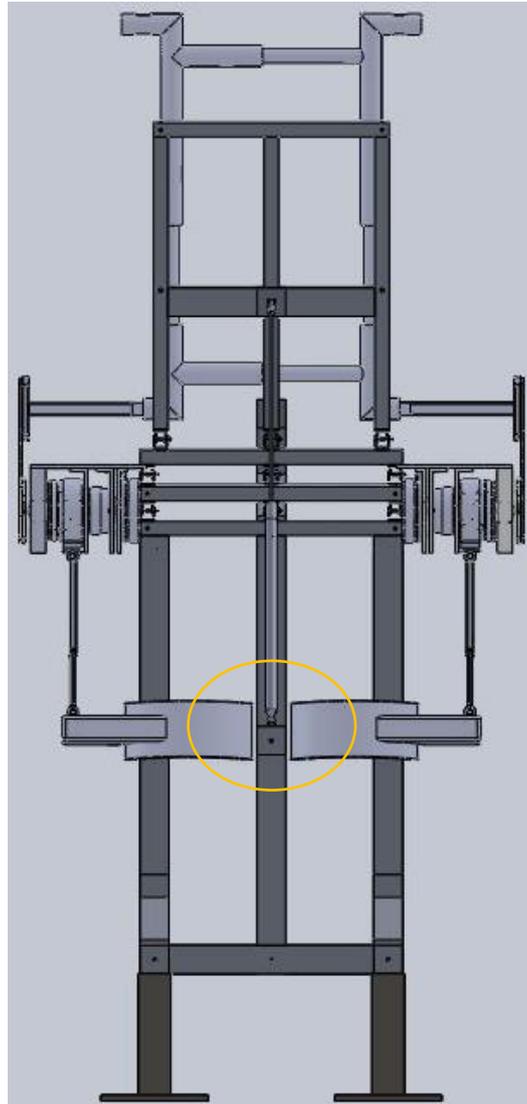


Figura 54 Dettaglio sulla parte anteriore del complessivo: si può notare la criticità dovuta all'eccessiva vicinanza tra i cosciali e la struttura del banco prova (zona cerchiata)

3.5 Confronto con tipologie di simulatori già esistenti

In questa sezione dell'elaborato viene riportato un confronto tra il prototipo del banco prova sviluppato dal candidato e simulatori già esistenti ed utilizzati per effettuare i test su esoscheletri industriali per sostegno del busto.

In particolare, viene presentato il simulatore utilizzato per testare l'esoscheletro HAL (*Figura 55*), un esoscheletro per il supporto lombare sviluppato dall'università giapponese di Tsukuba e dalla azienda CYBERDYNE.



Figura 55 Esoscheletro per il supporto lombare HAL

Per testare questo dispositivo, come riportato nell'articolo [8], e' stato realizzato un banco prova simulativo dalle fattezze umane costituito da una struttura scheletrica in acciaio di supporto, piastre in acciaio per la distribuzione ottimale della massa e una copertura realizzata tramite stampa 3D che simula le fattezze di un busto umano e permette all'esoscheletro di essere correttamente agganciato alla struttura (*Figura 56*).



Figura 56 Banco prova per test sull'esoscheletro HAL

Dal confronto tra questo e il simulatore progettato dal candidato, appaiono diverse differenze sia in termini di funzionamento sia strutturali.

Dal punto di vista strutturale, le due strutture differiscono, oltre per la struttura in sé, anche per la diversa articolazione della struttura del bacino (*Figura 57*). Nel banco del candidato infatti, si hanno due assi di rotazione (giunto dell'anca e lombo-sacrale) e si ha la possibilità di bloccare uno o l'altro in qualsiasi momento; nel simulatore presentato nell'articolo [8] invece, si osserva come sia presente un unico giunto corrispondente a quello dell'anca e non ve ne sia uno equivalente al giunto lombo-sacrale. Dunque, il banco prova progettato risulta più flessibile e permette lo studio di esoscheletri con più giunti, come ad esempio nel caso dell'esoscheletro in studio esposto in questo elaborato.

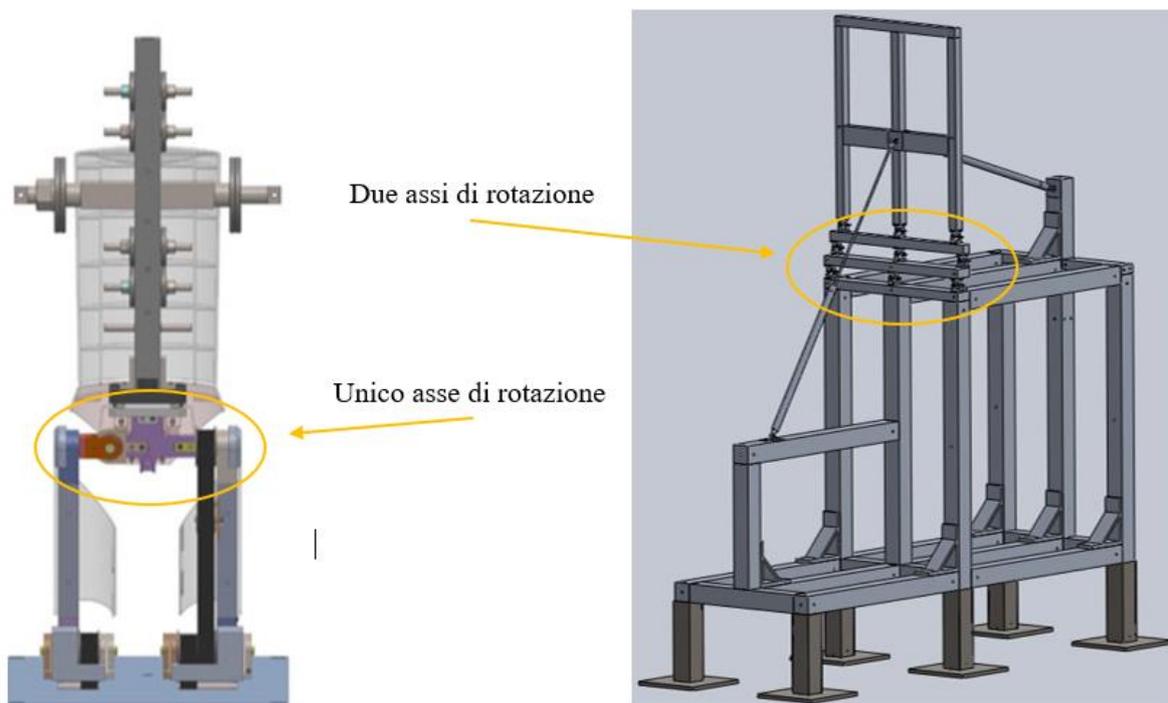


Figura 57 Confronto tra le strutture dei due banchi prova; è evidenziata la sostanziale differenza tra le modalità di simulazione del bacino

Nel banco prova per HAL inoltre, vengono utilizzati attuatori elettrici per la movimentazione della struttura che sono installati nella sua base: uno sotto la gamba destra, che trasferisce coppia al giunto del ginocchio destro tramite una cinghia di trasmissione, e uno sotto quella sinistra, che trasferisce coppia al ginocchio sinistro e al giunto d'anca sinistro tramite sempre delle cinghie di trasmissione.

Dal punto di vista del funzionamento invece, si hanno alcune differenze per quanto riguarda la simulazione del piegamento in avanti: in entrambi viene simulato il medesimo movimento di flessione, ma la differenza sostanziale ricade sempre a livello del bacino.

Avendo infatti un asse di rotazione in più, il banco del candidato segue più fedelmente quella che è la reale curvatura della schiena in flessione, che è generata dalla rotazione simultanea nei due giunti d'anca e lombo sacrale (*Figura 59*). Il simulatore di HAL invece garantisce solamente la flessione intorno all'asse dell'anca (*Figura 58*).

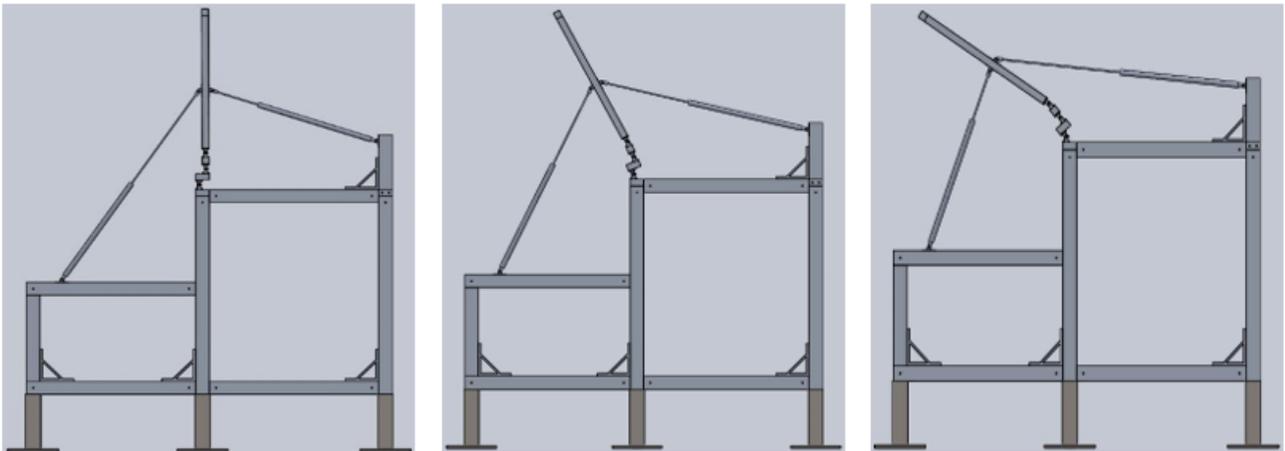


Figura 59 Flessione della struttura del tronco nel banco prova sviluppato dal candidato



Figura 58 Flessione del simulatore per i test sull'esoscheletro HAL

In conclusione, i due simulatori risultano essere validi per effettuare test per la valutazione delle prestazioni, su esoscheletri della stessa categoria, pur possedendo sostanziali differenze.

Capitolo 4

Conclusioni

Nel presente elaborato, è stato illustrato l'iter progettuale che ha portato alla realizzazione del modello di un prototipo di simulatore della persona universale, atto a consentire test sperimentali su esoscheletri industriali per il sostegno del busto.

Partendo dal modello di un esoscheletro in fase di sviluppo, dopo averne ultimato la progettazione e l'assemblaggio, il candidato ha identificato in primo luogo quelli che sono i vincoli progettuali che dovranno essere rispettati nel banco prova finale, e, in seguito, ne ha sviluppato un prototipo, cercando di creare un simulatore che replicasse il più fedelmente possibile la cinematica della flessione umana.

Sono state sviluppate tre varianti del banco prova, ognuna avente sistemi unici atti a simulare forze e coppie necessarie per i successivi test. Tutte le componenti sono state modellate dal candidato sul software SolidWorks sulla base di un dimensionamento preliminare e sulla base di dati ricavati da elementi commerciali scelti da catalogo. La struttura di base è stata pensata per essere facilmente montabile e smontabile, per essere poco ingombrante e per garantire la massima stabilità durante le fasi di prova.

È stata posta un'attenzione particolare nella progettazione della struttura per la simulazione del bacino: si sono cercate di rispettare quelle che sono le dimensioni antropometriche del 95 percentile uomo e si è garantito il rispetto delle posizioni per i due assi principali necessari per consentire la flessione del busto della persona, ovvero l'asse dell'anca e l'asse lombo-sacrale.

Dal confronto con altre tipologie di simulatori di persona inoltre, si è potuto constatare come il dispositivo ideato dallo studente abbia una grande flessibilità e adattabilità per consentire lo studio di esoscheletri con set-up differenti tra loro. Sviluppi successivi potranno basarsi sulle idee e sul prototipo sviluppato in questo elaborato per garantire molti miglioramenti sia dal punto di vista strutturale e sia da quello funzionale.

Il candidato ha inoltre effettuato una ricerca bibliografica atta a identificare quelle che sono oggi le metodologie di test, e le relative normative, per gli esoscheletri industriali; queste informazioni saranno utili per le future prove sperimentali che verranno effettuate sull'esoscheletro in fase di sviluppo presso i laboratori del DIMEAS del Politecnico di Torino.

Capitolo 5

Sviluppi futuri

Il progetto esposto in questo elaborato ha portato alla realizzazione di un prototipo di simulatore della persona; essendo ancora in fase prototipale, il dispositivo dovrà essere sviluppato e completato in studi futuri. Di seguito viene riportato un possibile iter pratico, proposto dal candidato, per il proseguimento del lavoro.

Gli sviluppi futuri del progetto dovranno essere focalizzati inizialmente sullo studio più approfondito dei prototipi del banco prova, in modo tale da rilevare e risolvere eventuali problematiche, apportare modifiche e migliorie al sistema, così da ottimizzare il tutto prima della messa in produzione del primo prototipo fisico.

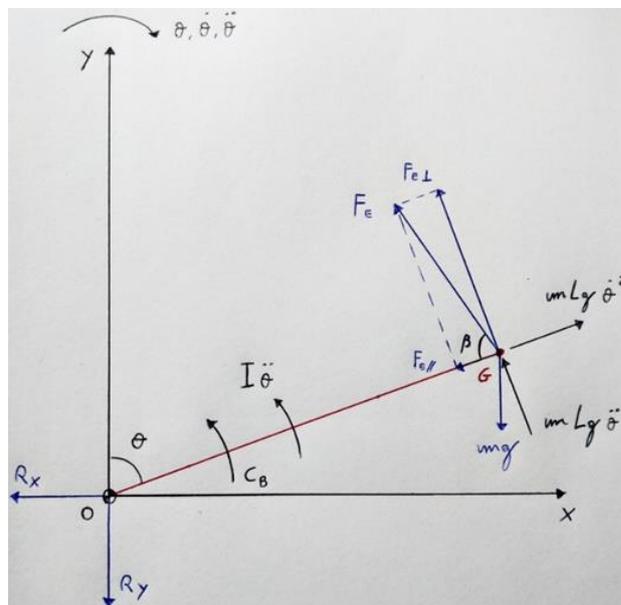
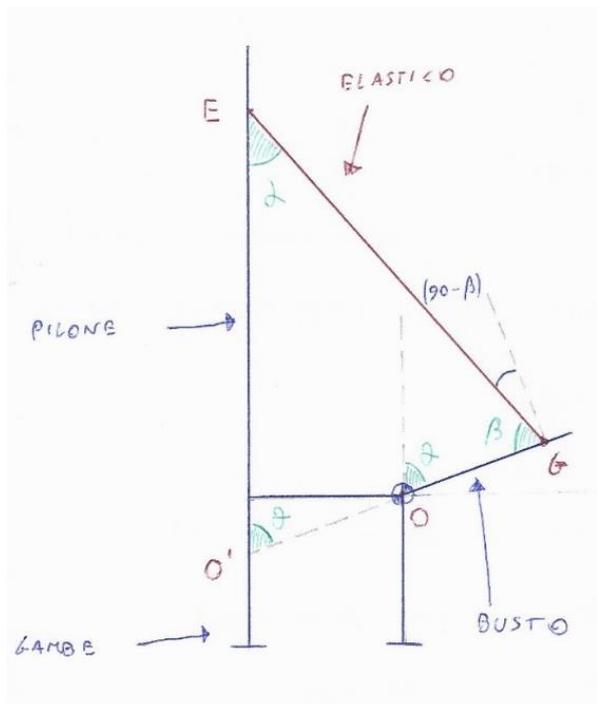
In parallelo allo sviluppo del simulatore, occorrerà ricercare e identificare la sensoristica adeguata da installare e utilizzare sull'esoscheletro e sul simulatore; questa è necessaria per i futuri test sperimentali a banco. Sarà necessario sviluppare anche un sistema di valvole, ed un opportuno sistema di controllo, per il dispositivo esoscheletrico e per il banco prova.

Dovrà essere ideato, e progettato, un sistema di aggancio pelvico e gambale che permetta all'esoscheletro di essere indossato sul banco prova e, successivamente, sull'operatore umano. L'idea di base è quella di progettare una cinta pelvica per la connessione con le piastre motorizzate, e di un paio di cosciali che permettano l'unione con il leglink.

Una volta ultimati gli sviluppi di banco prova, sistema di controllo e sistema di agganci, sarà opportuno effettuare i primi test sperimentali sull'esoscheletro, in modo tale da individuarne le criticità di funzionamento e garantirne gli standard secondo normativa.

Appendice A

Vengono riportati i calcoli relativi al diagramma del corpo libero della prima variante del banco prova sviluppato dal candidato.



Nella tabella dei dati sottostante, sono evidenziati in arancione e in giallo i valori variabili durante la flessione e sui quali si può intervenire per effettuare eventuali regolazioni:

Dati			
Massa tronco	57	kg	
$(I+mLg^2)$	7.7	kgm^2	
Angolo di inclinazione	70	$^\circ$	θ
Angolo di inclinazione	1.22	rad	θ
Accelerazione da legge cicloidale	-0.52	rad/s^2	massima
Lg distanza baricentro	0.5	m	OG
Acc. Gravitazionale	9.8	m/s^2	
Distanza OG origine/elastico	0.5	m	OG
Coppia BF (C_b)	80	N	
Calcolo altezza supporto			
Angolo tra supporto ed elastico	45	$^\circ$	α
Angolo tra supporto ed elastico	0.79	rad	α
Angolo tra elastico e busto	65.00	$^\circ$	β
Angolo tra elastico e busto	1.13	rad	β
Distanza supporto/elastico	1.00	m	O'E
Altezza supporto	1.3	m	O'P

Tabella 1 Dati relativi al diagramma di corpo libero della prima variante del simulatore

Equilibrio del momento rispetto ad O:

$$C_b + (I + mLg^2) \frac{d^2\theta}{dt^2} + Fe_p * Lg = m * g * Lg * \sin(\theta)$$

1- Caso statico, accelerazione pari a 0; la coppia resistente fornita dagli elastici è:

$$Fe_p * Lg = C_e = 185,22 \text{ Nm}$$

2- Caso dinamico, accelerazione negativa, fase di decelerazione;

$$Fe_p * Lg = C_e = 189,22 \text{ Nm}$$

Nota la coppia resistente fornita dal Backframe $C_b = 80$ [Nm], è possibile ricavare la coppia massima generata dalla massa del busto della persona nella fase di decelerazione nel raggiungimento dell'angolo massimo di flessione θ :

$$C_e + C_b = 269,22 \text{ Nm}$$

Nota la coppia C_e , è possibile ricavare la forza Fe_p , componente perpendicolare della forza resistente Fe fornita dall'elastico nella configurazione studiata per il banco prova.

Coppia resistente elastici			
Me	43	kg	forza massima elastico
Fe	378.4	N	forza componente elastico
Ce	189.2	Nm	coppia

Tabella 2 Forza dell'elastico e coppia muscolare C_e

Calcolo delle reazioni vincolari alla cerniera O nel caso statico:

1- Posizione al massimo angolo di flessione $\theta = 70^\circ$:

$$Rx = Fe * \cos\beta * \cos(90 - \theta) = 150,27 \text{ N}$$

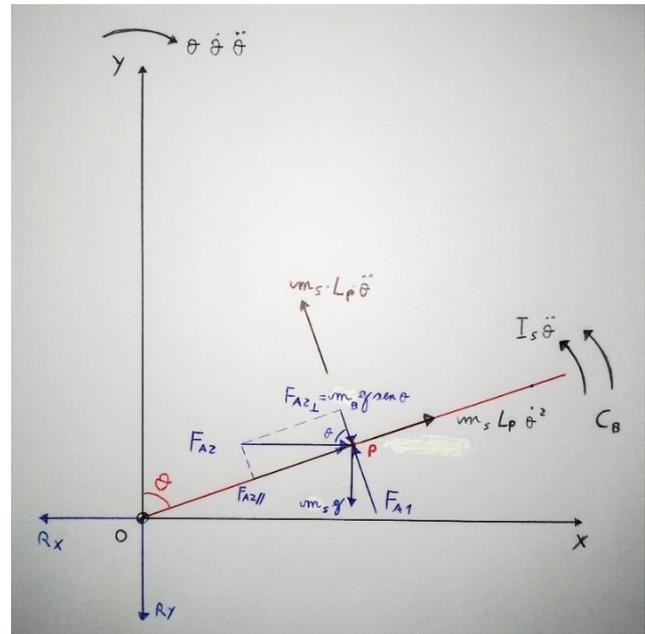
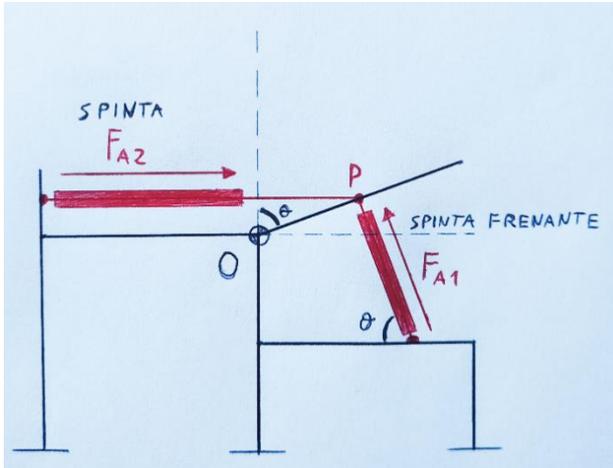
$$Ry = Fe * \cos\beta * \sin(90 - \theta) = 57,4 \text{ N}$$

2- Posizione verticale del busto, $\theta = 0^\circ$:

$$Rx = mg = 564,5 \text{ N}$$

$$Ry = 0 \text{ N}$$

Vengono riportati i calcoli relativi al diagramma del corpo libero della terza variante del banco prova sviluppato dal candidato.



Nella tabella dei dati sottostante, sono evidenziati in arancione i valori su cui si può intervenire per effettuare eventuali regolazioni:

Dati			
Massa tronco	56.4	kg	mb
Is	0.0125	kgm ²	
Angolo di inclinazione	70	°	θ
Angolo di inclinazione	1.22	rad	θ
Accelerazione da legge cicloidale	-0.52	rad/s ²	massima
Lp distanza pistone forza peso	0.265	m	OG
Acc. Gravitazionale	9.8	m/s ²	
Distanza OP origine/pistone addominale	0.265	m	OP
Coppia BF (Cb)	80	N	
Massa struttura	0.6	Kg	ms

Tabella 3 Dati relativi al diagramma di corpo libero della terza variante del simulatore

Equilibrio del momento rispetto ad O, ricavo la coppia resistente fornita dal pistone anteriore:

$$C_b + (I_s + m_s * Lg^2) \frac{d^2\theta}{dt^2} + Fa_1 * Lp = m_s * g * Lp * \sin(\theta) + Fa_{2p} * Lp$$

$$Fa_1 * Lp = C_{a1} = 59,1 Nm$$

Nota la coppia C_{a1} , è possibile ricavare la forza Fa_1 di spinta che dovrà applicare l'attuatore anteriore. La componente normale alla struttura a portale della forza di spinta Fa_2 , applicata dal pistone posteriore, dovrà essere uguale alla componente normale della forza peso reale del busto della persona: tramite essa è possibile ricavare Fa_2 che dovrà essere applicata dall'attuatore posteriore.

Forze attuatori lineari			
Fa1	223.1	N	forza pistone addominale
Ca1	59.1	Nm	coppia muscolare
Ctot	139.1	Nm	coppia totale
Fa2p	519.4	N	Componente tangenziale della Forza pistone posteriore
Fa2	1518.6	N	Forza pistone posteriore

Tabella 4 Riporta le forze dei due attuatori Fa1 e Fa2

Calcolo delle reazioni vincolari alla cerniera O nel caso statico:

3- Posizione al massimo angolo di flessione $\theta = 70^\circ$:

$$Rx = Fa2 = 1518,6 N$$

$$Ry = Fa1 * \cos(90 - \theta) - ms * g = 203,6 N$$

4- Posizione verticale del busto, $\theta = 0^\circ$:

$$Rx = ms * g = 6 N$$

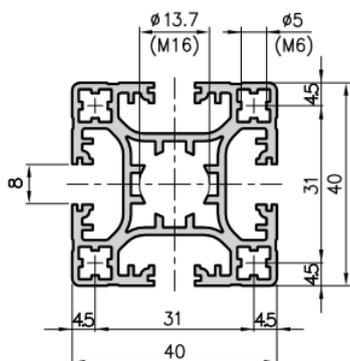
$$Ry = 0 N$$

Appendice B

Vengono riportati i data sheet, ricavati da catalogo Meccania, dei profilati utilizzati per la modellazione della struttura del banco prova.

Profilati in lega d'alluminio: base 40 mm

Profilato superleggero 40x40 - C03-1



Dati tecnici

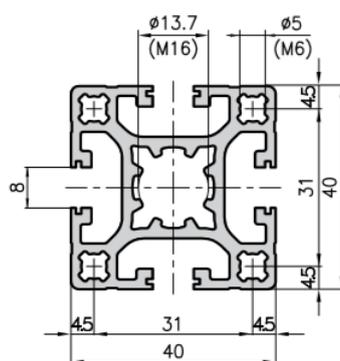
I_x, I_y	=	8,20 cm ⁴
W_x, W_y	=	4,10 cm ³
Superficie del profilato	=	4,90 cm ²
Peso	=	1,3 kg/m

Dati per l'ordine

Lungh. a magazzino 6000 mm	Codice d'ordine
Tagliato a misura	C03-1-00/6000 C03-1-02-02/...

Lavorazioni supplementari Pagine 76-80

Profilato leggero 40x40 - C02-1



Dati tecnici

I_x, I_y	=	9,36 cm ⁴
W_x, W_y	=	4,67 cm ³
Superficie del profilato	=	6,70 cm ²
Peso	=	1,5 kg/m

Dati per l'ordine

Lungh. a magazzino 6000 mm	Codice d'ordine
Tagliato a misura	C02-1-00/6000 C02-1-02-02/...

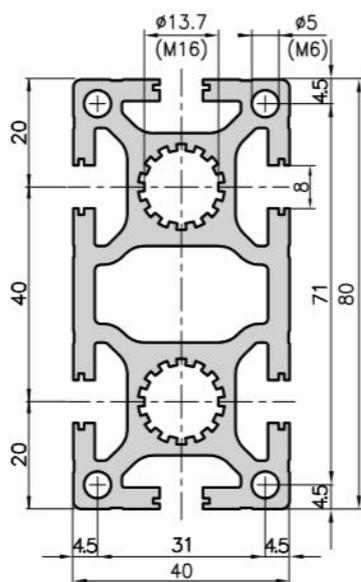
Lavorazioni supplementari Pagine 76-80

Applicazioni

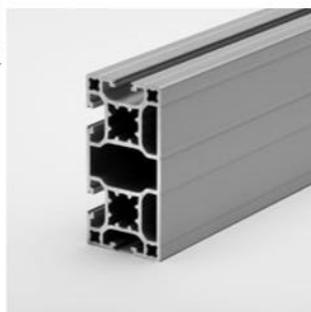
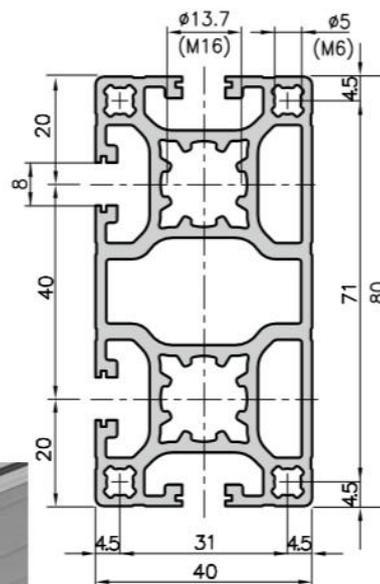
Questi profilati leggeri sono particolarmente funzionali: pur con pesi ridotti, è possibile realizzare strutture con notevole portata di carico.



Profilato base 40x80 - C01-3



Profilato frontale 40x80 - C01-5



Applicazioni

Come tutti i profilati parzialmente chiusi, e grazie alla presenza di poche scanalature, sono ideali per applicazioni dove occorre la massima pulizia.

Dati tecnici

I_x	=	81,96 cm ⁴
I_y	=	22,74 cm ⁴
W_x	=	20,49 cm ³
W_y	=	11,37 cm ³
Superficie del profilato	=	13,50 cm ²
Peso	=	3,7 kg/m

Dati per l'ordine Codice d'ordine

Lungh.a magazzino 5000 mm	C01-3-00/5000
Tagliato a misura	C01-3-02-02/...

Lavorazioni supplementari Pagine 76-80

Dati tecnici

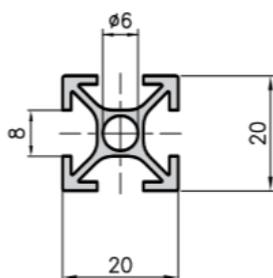
I_x	=	64,40 cm ⁴
I_y	=	17,20 cm ⁴
W_x	=	16,10 cm ³
W_y	=	8,60 cm ³
Superficie del profilato	=	9,76 cm ²
Peso	=	2,6 kg/m

Dati per l'ordine Codice d'ordine

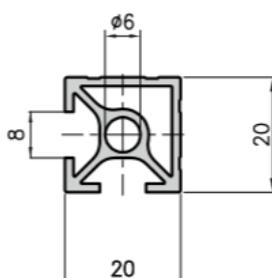
Lungh.a magazzino 5000 mm	C01-5-00/5000
Tagliato a misura	C01-5-02-02/...

Lavorazioni supplementari Pagine 76-80

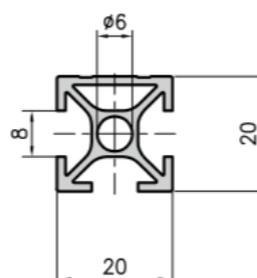
Profilato base 20x20 - D01-5



Profilato angolare 20x20 - D01-3



Profilato frontale 20x20 - D01-8



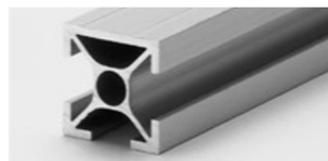
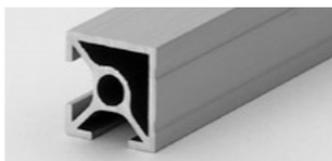
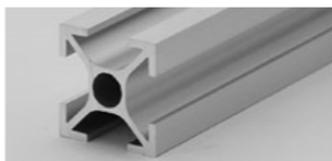
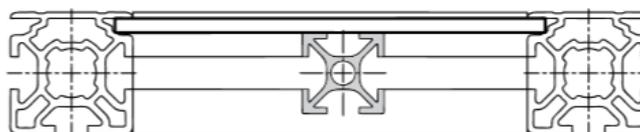
Applicazioni

I profilati 20x20/40, per i loro pesi e valori di resistenza relativamente bassi, sono utilizzabili solo per carichi limitati, ad esempio per il fissaggio di interruttori finecorsa, cornici leggere, vetrinette, ecc.

Per tutti i profilati D con fori da $\varnothing 6$ sono utilizzabili gli inserti filettati M6 (DIN 8140).

Codice di lavorazione: H3/H4.

Inoltre i profilati 20x20/40 sono indicati come rinforzi o come profilati di appoggio dietro a elementi piani, in combinazione con i profilati per rivestimenti di base 30 (vedere disegno).



Dati tecnici

I_x, I_y	=	0,60 cm ⁴
W_x, W_y	=	0,60 cm ³
Superficie del profilato	=	1,40 cm ²
Peso	=	0,38 kg/m

Dati tecnici

I_x, I_y	=	0,66 cm ⁴
W_x, W_y	=	0,66 cm ³
Superficie del profilato	=	1,64 cm ²
Peso	=	0,42 kg/m

Dati tecnici

I_x	=	0,68 cm ⁴
I_y	=	0,60 cm ⁴
W_x	=	0,68 cm ³
W_y	=	0,60 cm ³
Superficie del profilato	=	1,46 cm ²
Peso	=	0,39 kg/m

Dati per l'ordine

Lungh. a magazzino 6000 mm	D01-5-00/6000
Tagliato a misura	D01-5-02-02/...

Lavorazioni supplementari Pagine 76-80

Dati per l'ordine

Lungh. a magazzino 6000 mm	D01-3-00/6000
Tagliato a misura	D01-3-02-02/...

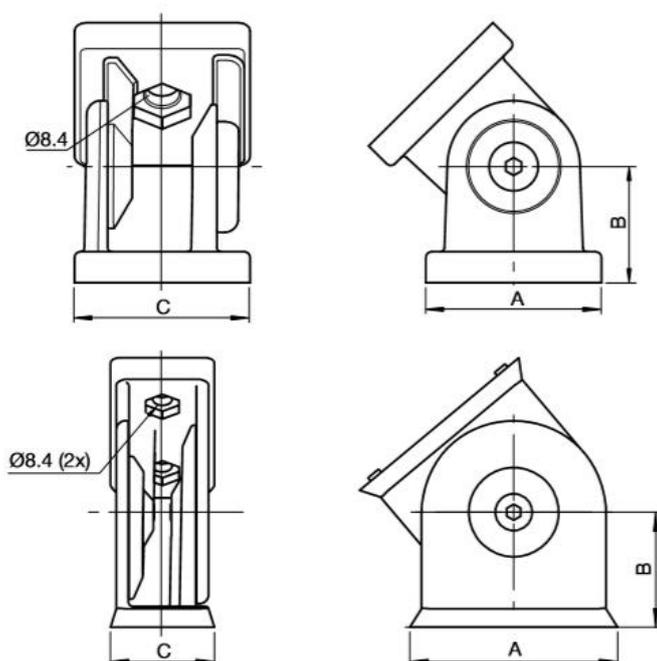
Lavorazioni supplementari Pagine 76-80

Dati per l'ordine

Lungh. a magazzino 6000 mm	D01-8-00/6000
Tagliato a misura	D01-8-02-02/...

Lavorazioni supplementari Pagine 76-80

Articolazione a cerniera, bloccabile profilati base 20 / 30 / 40 / 45



Applicazioni

Principalmente usate per rinforzare strutture mediante saette diagonali con profilati base 20/30/40/45 mm e inclinazioni secondo necessità.
Anche adatte come cerniera per fissare attrezzature (consolle, display ecc.).

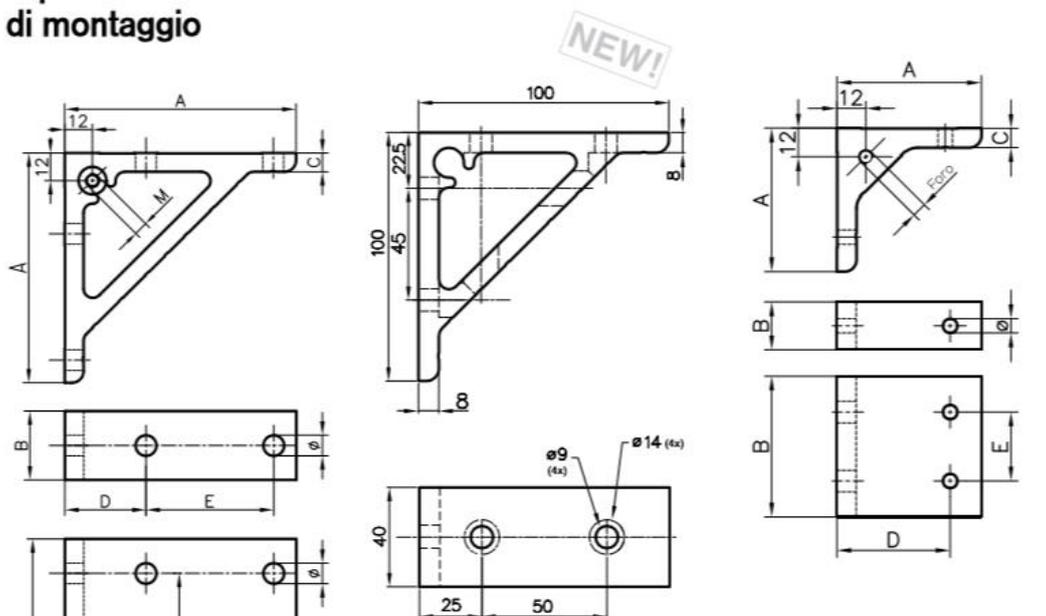
Descrizione

Particolarmente robuste, sono realizzate in alluminio pressofuso.

Dati per l'ordine				Codice d'ordine	
Base profilato	A	B	C	Con maniglia	Con viti
20x20	20	15	20	D90-00-M	D90-00
30x30	30	22,5	30	B90-00-M	B90-00
40x40	40	30	40	C90-00-M	C90-00
40x80	80	50	40	C90-02-M	C90-02
45x45	45	30	45	E90-00-M	E90-00
45x90	90	50	45	E90-02-M	E90-02



Squadretta di montaggio

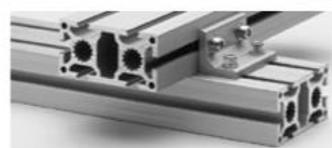


Applicazioni

La squadretta di montaggio è un elemento di connessione che viene utilizzato anche in combinazione con il connettore PVS e svolge innanzitutto la funzione di rinforzo. Con l'inserto filettato integrato rappresenta anche una possibilità di fissaggio di elementi piani.

Descrizione

Alluminio, anodizzato naturale.



Dimensioni Codice d'ordine

A	B	C	D	E	F	Ø	M*
100	30	8	35	55	-	Ø	A30-30
100	30	8	25	50	-	Ø	A30-31
100	75	8	25	50	50	Ø	A30-32
100	30	8	35	55	-	Ø	M6 A30-40
100	20	8	35	55	-	6,5	B30-30
100	20	8	35	55	-	6,5	M6 B30-40
70	25	5	20	40	-	6,5	C30-30
70	65	5	20	40	40	6,5	C30-32

*Inserto filettato



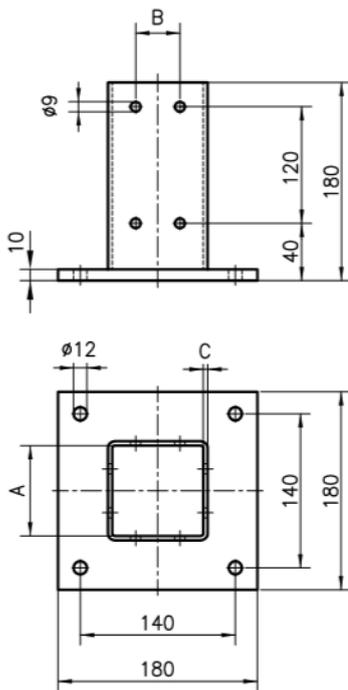
Dimensioni Codice d'ordine

100x100x40 AE30-30

Dimensioni Codice d'ordine

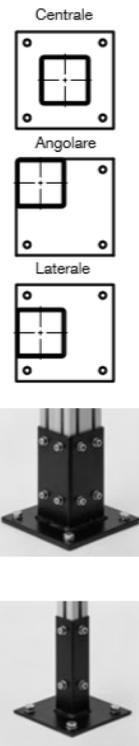
A	B	C	D	E	Ø	Foro
60	20	8	46	-	6,5	Ø6 B30-10
60	20	8	46	-	6,5	M6 B30-20
60	30	8	46	-	Ø6	A30-10
60	30	8	46	-	Ø6	M6 A30-20
38	30	8	25	-	Ø	A30-00
38	80	8	25	50	Ø	A30-02
31	20	6	20	-	6,5	C30-00
31	60	6	20	40	6,5	C30-02
38	30	8	22,5	-	Ø	E30-00
38	90	8	22,5	45	Ø	E30-02

Basi di fondazione



Kit di fissaggio*
(vale per tutti i modelli)
8 viti cilindriche, 8 piastre filettate,
8 rondelle.

Dati per l'ordine		Codice d'ordine		
A	B	C	Modello	
Profilato				
80x80	82	40	4	Centrale C47-36 Angolare C47-37 Laterale C47-38 C47-36S
Kit di fiss.				
Profilato				
90x90	92	46	4	Centrale E47-36 Kit di fiss. E47-36S

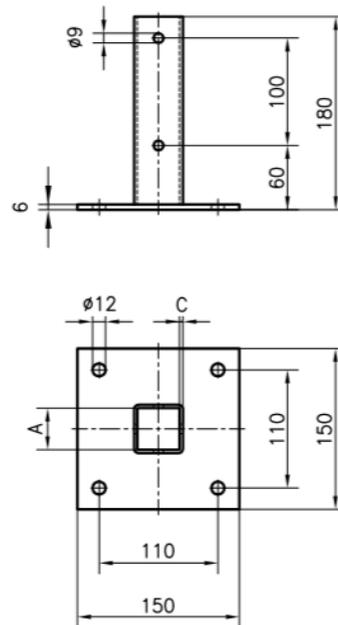


Applicazioni

Le basi di fondazione si usano quando i montanti devono avere un'elevata stabilità sul pavimento. Il profilato si infila facilmente nel tubo di guida e viene fissato con il set di fissaggio in dotazione. Con i tre modelli diversi si può far fronte a differenti condizioni di spazio disponibile.

Descrizione

Acciaio nero verniciato a polvere nera.



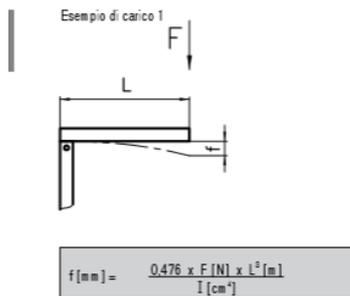
Kit di fissaggio*
(vale per tutti i modelli)
4 viti cilindriche, 4 piastre filettate,
4 rondelle.

Dati per l'ordine		Codice d'ordine		
A	B	C	Modello	
Profilato				
40x40	41	-	2	Centrale C47-32 Angolare C47-33 Laterale C47-34 C47-32-S
*Kit fissaggio				
Profilato				
45x45	47	-	4	Centrale E47-32 *Kit fissaggio E47-32-S
Profilato				
50x50	52	-	4	Centrale A47-32 Angolare A47-33 Laterale A47-34 *Kit fissaggio A47-32-S

Viene riportato il data sheet, estratto da catalogo Meccania, con le caratteristiche e i calcoli strutturali dei profilati selezionati per la modellazione del banco prova.

Caratteristiche tecniche dei profilati

Calcoli di resistenza



Dati:

- F = Carico in N
- L = Lunghezza profilato in m
- I = Momento d'inerzia in cm⁴
- f = Inflexione in mm
- a/b = Distanza dal punto di carico in m
- q = Carico parziale in N/m



Esempio:

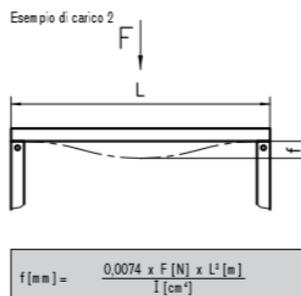
Su un braccio in profilato di 800 mm di lunghezza deve essere fissato un equilibratore di peso con portata max. 500 N. Quanto si flette un profilo base da 40x40 mm tipo C01-1?

$$\text{Flessione } f = \frac{0,476 \times 500 \times 0,8^3}{11,70} = 10,42 \text{ mm}$$

Controllo della sollecitazione di flessione:

$$\delta = \frac{M_b}{W \times 10^3}$$

- δ = Sollecitazione di flessione in N/mm²
- M_b = Momento di flessione max Nmm
- W = Momento di resistenza in cm³



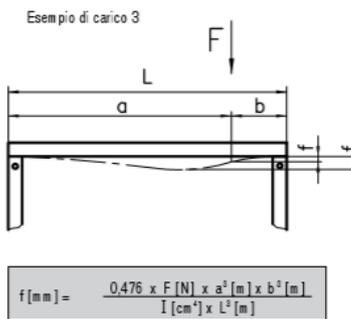
Esempio:

Una traversa viene caricata con 1800 N nel centro. La lunghezza portante libera è di 1200 mm. L'inflexione massima deve essere di 1,0 mm. Quale profilato occorre utilizzare per la traversa?

$$\text{Flessione } f = \frac{0,0074 \times F \times L^3}{I} \Rightarrow I = \frac{0,0074 \times F \times L^3}{f}$$

$$\text{Momento d'inerzia } I = \frac{0,0074 \times 1800 \times 1,2^3}{1,0} = 23,02 \text{ cm}^4$$

⇒ Scelta: Profilato pesante MA1-1 con I = 29,37 cm⁴



Esempio:

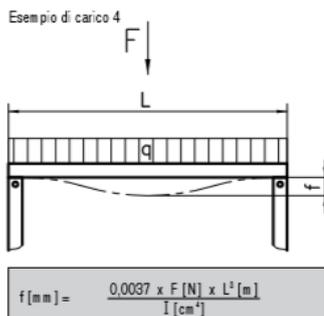
Una campata con luce 2500 mm deve sostenere una trave a 850 mm dall'estremità. Il carico di appoggio è pari a 1200 N. Come traversa della campata si usa un profilato base da 50 x 100. Di quanto è l'inflessione nel punto di appoggio della trave?

$$\text{Flessione } f = \frac{0,476 \times 1200 \times 1,65^2 \times 0,65^2}{149,84 \times 2,5^3} = 0,67 \text{ mm}$$

Dati:

F = Carico in N
L = Lunghezza profilato in m
I = Momento d'inerzia in cm⁴
f = Flessione in mm
a/b = Distanza dal punto di carico in m
q = Carico parziale in N/m

a > b	$f_m[\text{mm}] = \frac{0,952 \times F[\text{N}] \times a^2[\text{m}] \times b^2[\text{m}]}{I[\text{cm}^4] \times L^3[\text{m}]} \left(\frac{L[\text{m}]}{L[\text{m}] + 2a[\text{m}]} \right)^2$
a < b	$f_m[\text{mm}] = \frac{0,952 \times F[\text{N}] \times a^2[\text{m}] \times b^2[\text{m}]}{I[\text{cm}^4] \times L^3[\text{m}]} \left(\frac{L[\text{m}]}{L[\text{m}] + 2b[\text{m}]} \right)^2$



Esempio:

Il piano di riscontro (trascurando la stabilità intrinseca) deve flettersi al massimo di 0,4 mm. Il tavolo di misurazione è profondo 1500 mm e il carico parziale per lato del tavolo è di 8000 N/m.

$$F = q \times L = 8000 \times 1,5 = 12000 \text{ N}$$

$$\text{Flessione } f = \frac{0,0037 \times F \times L^2}{I} \Rightarrow I = \frac{0,0037 \times F \times L^2}{f}$$

$$\text{Momento d'inerzia } I = \frac{0,0037 \times 12000 \times 1,5^2}{0,4} = 374,64 \text{ cm}^4$$

⇒ Scelta: profilo pesante MA1-5 (100 x 100) con I = 380,00 cm⁴

$$F = q \times L$$

Viene riportato il data sheet relativo al gilet zavorrato. E' stato tratto dal seguente link:
<https://www.timebreak.eu/it/web-store/attrezzi-da-fitness/pesi-fitness/giubbotti-con-pesi-giubbotto-zavorrato/gilet-pesi-bushido-da-18-o-30kg-con-regolazione-spalle-e-vit>

TimeBREAK
get your

800 97 43 34
LUN - VEN 9.00 -15.00

CERCA...

Carrello: (0)

3 PASSI PER L'ACQUISTO
SENZA REGISTRAZIONE

100% SODDISFATTI O
RIMBORSATI

ATTREZZI FITNESS | ARTICOLI SPORTIVI | PISCINE INTEX | PISCINE BESTWAY | GIOCHI | CASA & CAMPEGGIO | **IDEE REGALO** | OFFERTA | OUTLET

Home / ATTREZZI FITNESS / Pesi Fitness & Crossfit / Giubbotto zavorrato

« Precedenti » « Successive »

CATEGORIE

- ATTREZZI FITNESS
 - Fitness & Aerobica
 - Accessori Fitness
 - Pesi Fitness & Crossfit
 - Pesi per caviglia & polso (7)
 - Giubbotto zavorrato (9)**
 - Powerbag & Sacca
 - Bulgara (4)
 - Pesi & Accessori (32)
 - Bilancieri & dischi (13)
 - Manubri regolabili (6)
 - Body Pump pesi (4)
 - Impugnature per stazioni (20)
 - Porta pesi e manubri (7)

GILET PESI BUSHIDO FINO 40 KG!

139,00 € IVA inclusa

Servizio di consegna: 10,90 €

Consegna prevista in: 1-3 giorni lavorativi
Articolo disponibile

SKU: VESTBUSHIDO40

Introduzione Veloce

Il piu' venduto giubbotto zavorrato con pesi di sabbia estraibili e cinghie in nylon per la regolazione secondo la conformazione corporea individuale.

Opzioni

40 kg



Appendice C

Viene riportato l'elenco dei componenti commerciali acquistati per la parte motrice delle piastre laterali dell'esoscheletro in studio (Tabella 1).

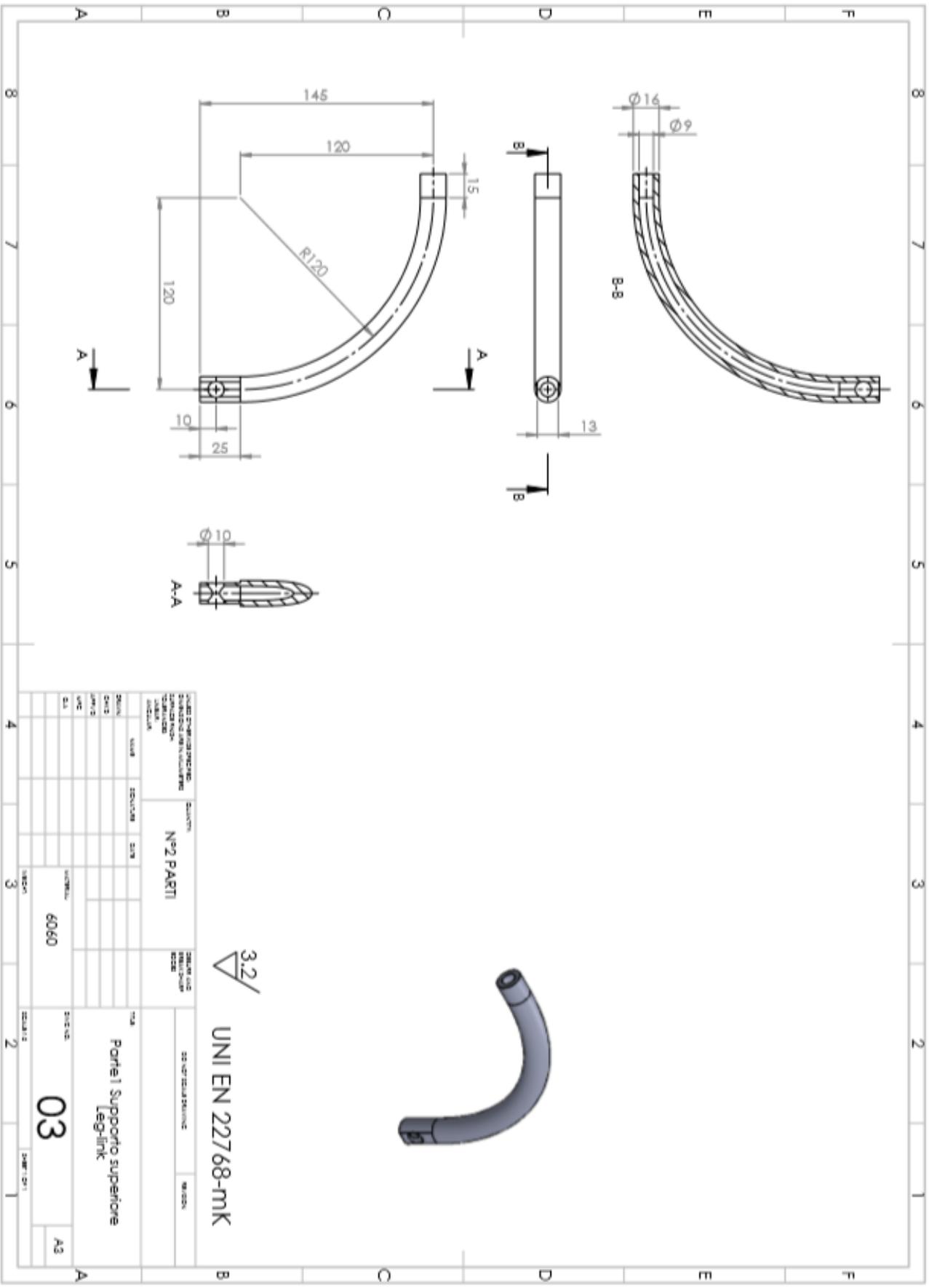
COMPONENTI COMMERCIALI DA ACQUISTARE		
COMPONENTE	MODELLO	QUANTITA'
CUSCINETTO	3206 A-2RS1	2
CUSCINETTO	3201 A-2ZTN9/MT33	6
PULEGGIA	35AT101831	4
PULEGGIA	35AT102431	4
CINGHIA	34S0560016	2
CINGHIA	34S0700016	2

Tabella 5 Componenti commerciali acquistati

Viene riportato l'elenco della minuteria necessaria per l'assemblaggio dell'esoscheletro in studio (Tabella 2) [9].

MINUTERIA		
COMPONENTE	MODELLO	QUANTITA'
Vite	ISO4017 M5x20	8
Vite	ISO4017 M5x30	8
Vite	ISO4017 M5x40	18
Vite	ISO4017 M3x20	8
Vite	ISO4017 M3x30	8
Dado	ISO4036 M8	4
Anello Seeger	DIN 472 J62	2
Anello Seeger	DIN 472 J32	6
Anello Seeger	DIN 471 J12	4
Anello Seeger	DIN 471 J16	2
Linguetta	UNI 6604 B 5x5x16	2
Ghiera	M12	2
Distanziale	φ12x4	4
Dado	ISO4036 M20	4
Boccola	φ16x53	2

Tabella 6 Elenco minuteria



3.2/

UNI EN 22768-MK

MODELLO: 22768-MK DIMENSIONI: 120x145x15 MATERIALE: 6060		QUANTITÀ: N°2 PARTI		PRELIEVO: 6060	
DESCRIZIONE: Porta1 Superiore superiore Leg-link		CODICE: 03		DIMENSIONI: 120x145x15	
DATA: 03/03/2011	AUTORE:	VERIFICATO:	APPROVATO:	DATA:	AUTORE:

BIBLIOGRAFIA

- [1] “*Test Methods for Exoskeletons – Lessons Learned from Industrial and Response Robotics*”, Roger Bostelman, Tsai Hong, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD 20899, USA, Le2i, Université de Bourgogne, BP 47870, 21078 Dijon, France
- [2] “*Assessment of an active industrial exoskeleton to aid dynamic lifting and lowering manual handling tasks*”, Kirsten Huysamen, Michiel de Looze, Tim Bosch, Jesus Ortiz, Stefano Toxiri, Leonard W. O’Sullivan, School of Design, Health Research Institute, University of Limerick, Limerick, Ireland, TNO, Schipholweg 77, 2316ZL Leiden, The Netherlands, Istituto Italiano di Tecnologia, Department of Advanced Robotics, Via Morego 30, 16163 Genova, Italy
- [3] “*Exoskeletons for industrial application and their potential effects on physical work load*”, Michiel P. de Looze, Tim Bosch, Frank Krause, Konrad S. Stadler & Leonard W. O’Sullivan (2015), Ergonomics, DOI: 10.1080/00140139.2015.1081988
- [4] “*Industrial Exoskeleton Technology: Classification, Structural Analysis, and Structural Complexity Indicator*”, A. Voilqu’ e, J. Masood, JC. Fauroux, L. Sabourin, O. Guezet, 2019 Wearable Robotics Association Conference (WearRAcon) Scottsdale, AZ, USA, March 26-28, 2019
- [5] “*Passive Back Support Exoskeleton Improves Range of Motion Using Flexible Beams*”, Matthias B. Näf1, Axel S. Koopman, Saskia Baltrusch, Carlos Rodriguez-Guerrero, Bram Vanderborght and Dirk Lefeber, published: 21 June 2018 doi: 10.3389/frobt.2018.00072
- [6] “*DIGITAL FLUID POWER FOR EXOSKELETON ACTUATION – GUIDELINES, OPPORTUNITIES, CHALLENGES*”, Rudolf Scheidl Johannes Kepler University Linz Altenbergerstraße 69; 4040 Linz, Austria, The Ninth Workshop on Digital Fluid Power, September 7-8, 2017, Aalborg, Denmark
- [7] “*Strength Testing Machines for Wearable Walking Assistant Robots based on Risk Assessment of Robot Suit HAL*”, Cota Nabeshima, Hiroaki Kawamoto and Yoshiyuki Sankai, 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation RiverCentre, Saint Paul, Minnesota, USA May 14-18, 2012
- [8] “*Standard Performance Test of Wearable Robots for Lumbar Support*”, Cota Nabeshima , Ko Ayusawa , Conrad Hochberg, and Eiichi Yoshida, IEEE ROBOTICS AND AUTOMATION LETTERS, VOL. 3, NO. 3, JULY 2018
- [9] “*Progettazione, modellazione e controllo di un esoscheletro pneumatico per uso industriale*”, Giuseppe Aloe, Relatore: Prof. Terenziano Raparelli, Correlatori: Riccardo Mala, Marco Pontin, Tesi di Laurea Magistrale in ingegneria meccanica, Politecnico di Torino, A.A. 2018-2019
- [10] Google
- [11] “*Valori normali, richiami diagnostici e dati clinici utili in pediatria*”, V.Maglietta, Tanner-Whitehouse
- [12] “*Physics of the human body*”, di Herman Irving P, Springer Verlag 2007
- [13] “*Basic Biomechanics*”, Susan J.Hall, 7th Edition

[14] *“Progetto di un esoscheletro con attuatori elettrici per applicazioni industriali”*, Giuseppe Rigogliuso, Relatore: Prof. Terenziano Raparelli, Correlatori: Prof. Luigi Mazza, Prof.ssa Gabriella Eula, Ing. Riccardo Mala, Ing. Marco Pontin, Tesi di Laurea Magistrale in ingegneria meccanica, Politecnico di Torino, A.A. 2018-2019

[15] *“Fundamentals of ergonomic exoskeleton robots”*, Schiele, A. ,Van der Helm, F.C.T., Mechanical Maritime and Materials Engineering, 2008-05-14

Ringraziamenti

Ci tengo molto a ringraziare il mio relatore, il Prof. Raparelli, ed i miei correlatori, la Prof.ssa Eula e il Prof. Mazza, per avermi seguito lungo tutto il mio percorso di tesi ed avermi dato l'opportunità di partecipare a questo progetto.

Ringrazio i miei splendidi genitori, senza i quali non avrei sicuramente superato tutti gli ostacoli ed i problemi di questi anni universitari. Li ringrazio per il grande supporto non solo economico, ma anche, e soprattutto, morale. Grazie per avere sopportato i miei sbalzi di umore, durante le lezioni, ma ,in particolare, in prossimità degli esami, periodi critici e carichi di stress, durante i quali non sono stato “facile” da gestire. Vi amo , è un bene immenso quello che provo nei vostri confronti!

Ringrazio tutti i miei parenti, tra cui, in particolare, i miei cugini, la mia “tata”, la sua famiglia e gli amici “adulti”, Piatti e Stilo, che hanno contribuito, con sincero affetto e adeguati consigli ,a rendere più sereno e agevole il mio percorso .

Che dire poi di quelli che considero i miei fratelli e le mie sorelle: Ale, Davi, Dario, Alice e Giulia , con i quali ho condiviso momenti di gioia, di spensieratezza, ma anche di tristezza e di “criticità”, superati grazie al bene e alla solidarietà che ci unisce. La loro amicizia è un grande dono e sono fiero di averli incontrati e di percorrere insieme un cammino : il loro supporto è stato vitale e lo sarà per il resto della mia vita.

Ringrazio tutti gli amici, grandi e piccoli, che mi sono stati vicini, durante l'infanzia e la giovinezza, e tutta la mia squadra di pallavolo (parte della mia seconda famiglia) .

Ringrazio tutti i miei compagni di viaggio, che mi hanno accompagnato durante questi anni di università, con molti dei quali ho stretto un legame molto forte, che spero duri per sempre.

Infine, voglio ringraziare la mia Sara. Grazie di cuore per tutto il supporto che mi hai dato da quando ci conosciamo, grazie per l'amorevole pazienza dimostrata in tutte le situazioni vissute insieme, per avermi aiutato a tirar fuori il meglio di me, incoraggiandomi a superare ogni difficoltà.

Francesco.