

# POLITECNICO DI TORINO

*Corso di Laurea Magistrale  
in Ingegneria Meccanica*

*Tesi di Laurea Magistrale*

*Analisi ed ottimizzazione di componenti di un esoscheletro  
per applicazione industriale.*



*Relatore*

*Prof. Terenziano Raparelli*

*Co-relatore: Pontin Marco*

*Co-relatore: Mala Riccardo*

*Candidato*

*Ignazio Pappadà*

*A.A. 2018/2019*

*“Quando un uomo rivolge tutta la  
sua volontà per una data cosa,  
finisce sempre per raggiungerla”*



# Indice

Introduzione.....	8
Anatomia di riferimento.....	9
L' importanza dell' anca .....	11
La colonna vertebrale: breve rimando.....	12
Il problema di oggi .....	13
Tipologie di esoscheletri.....	14
Campi applicativi.....	15
Esoscheletri presenti sul mercato o in fase di studio.....	16
Aspetti da risolvere .....	20
Il caso studio .....	21
<i>CAPITOLO I</i> .....	22
Analisi preliminare.....	22
Ipotesi semplificative.....	24
Analisi sperimentale del moto di flessione–estensione del tronco .....	25
Confronto tra legge cicloidale e andamento sperimentale.....	27
Dati antropometrici.....	28
Analisi Cinematica e Dinamica del dispositivo.....	29
Prova sperimentale attraverso Simscape Multibody .....	39
<i>CAPITOLO II</i> .....	42
Iter progettuale del dispositivo .....	42
Tipologie di attuatori .....	47
<i>CAPITOLO III</i> .....	50
Link–mobile .....	50
Approccio ingegneristico Back Frame .....	51
Calcoli strutturali Back Frame.....	52
Caratteristiche di sollecitazione piano yx.....	53
Caratteristiche di sollecitazione piano yz .....	55
Caratteristiche di sollecitazione piano xz.....	58



Diagrammi degli sforzi Back Frame .....	61
Diagramma di corpo libero puleggia.....	70
Reazioni agenti sull' attuatore.....	71
CAPITOLO IV .....	72
Link-fisso .....	72
Approccio ingegneristico Link Fisso.....	73
Calcoli strutturali Link Fisso .....	73
Caratteristiche di sollecitazione piano yx.....	74
Calcoli strutturali piano yz.....	74
Calcoli strutturali piano xz.....	79
Diagrammi degli sforzi Link Fisso.....	83
Diagramma di corpo libero puleggia.....	88
CAPITOLO V .....	89
Leg-Link.....	89
Approccio ingegneristico Leg-Link.....	90
Calcoli strutturali Leg-Link .....	91
Caratteristiche di sollecitazione piano yx.....	92
Caratteristiche di sollecitazione piano xz .....	93
Caratteristiche di sollecitazione piano yz .....	95
Diagrammi degli sforzi Leg-Link.....	96
CAPITOLO VI .....	105
Procedura di dimensionamento .....	105
Risultati ottenuti per tutti gli elementi.....	107
Concept definitivo dell' esoscheletro. ....	110
CAPITOLO VII .....	113
Problematiche riscontrate e possibili soluzioni.....	113
CAPITOLO VIII .....	115
Analisi FEM elementi struttura.....	115
Back Frame .....	116
Link fisso.....	118
Leg Link.....	122
Commento e considerazioni post simulazione .....	124



CAPITOLO IX .....	125
Conclusioni e Sviluppi Futuri.....	125
APPENDICE A1 .....	126
Dimensionamento Perno.....	126
APPENDICE A2 .....	131
Scelta attacchi per i 3 elementi della struttura .....	133
APPENDICE A3 .....	
Messe in tavola .....	



## Indice delle Figure

Figura 1–Assi del corpo umano .....	9
Figura 2–Piani del corpo umano.....	10
Figura 3–Schema anca e modello del giunto .....	11
Figura 4–Distribuzione delle vertebre.....	12
Figura 5–Analisi sperimentale K.Huysamen relativo all'allungamento della colonna vertebrale.....	12
Figura 6–Grafico a torta Inail su situazione DMS .....	13
Figura 7– Campi di applicazione esoscheletro .....	15
Figura 8–Dispositivo pensato da N.Koceska.....	16
Figura 9–Muscle Suits .....	16
Figura 10–Muscle Suits con interruttori tattili.....	17
Figura 11–Schema Muscoli McKibben.....	17
Figura 12–Esoscheletro Cyberdryne.....	18
Figura 13–Esoscheletro HERCULE .....	18
Figura 14–Esoscheletro LAEVO.....	19
Figura 15–Tensioni muscolari e coppia.....	22
Figura 16–Successione posizioni assunte dall'operatore .....	23
Figura 17–Posizione di piegamento massimo.....	23
Figura 18–Prova sperimentale effettuata in Laboratorio .....	25
Figura 19–Traiettoria ottenuta dai markers dopo la prova .....	26
Figura 20–Confronto cicloidale teorica/sperimentale.....	27
Figura 21–Dati parametrici in funzione dell'altezza .....	28
Figura 22–Legge Cicloidale.....	29
Figura 23–Andamento accelerazione tangenziale .....	30
Figura 24–Dcl uomo+struttura .....	31
Figura 25–Andamento Coppia del corpo.....	33
Figura 26–Modello uomo per determinazione inerzie.....	34
Figura 27–C_muscoli Vs C_Inerzia .....	36
Figura 28–Andamento Coppia Corpo,Coppia Muscoli, Coppia Exo a confronto .....	37
Figura 29–Coppia Esoscheletro .....	38
Figura 30–Schema a blocchi Simscape Multibody .....	39
Figura 31–Zoom schema a blocchi precedente.....	40
Figura 32–Risultati ottenuti dopo simulazione e confronto con i dati analitici .....	41
Figura 33–Bozza struttura.....	43
Figura 34–Posizioni successive Puleggia .....	45
Figura 35–Attuatore con stelo a doppio effetto .....	47
Figura 36–Muscolo pneumatico .....	47
Figura 37–Cilindro senza stelo.....	48
Figura 38–Dcl attuatore.....	48
Figura 39–Andamento pressione camera.....	49
Figura 40–Back–Frame.....	50



Figura 41–Leg–mobile: viste nello spazio .....	51
Figura 42–Dcl Back Frame.....	52
Figura 43–Convenzione utilizzata.....	53
Figura 44–Dcl Back Frame piano yz.....	54
Figura 45–Dcl Back Frame piano xz.....	57
Figura 46–Sforzo normale piano yx.....	61
Figura 47–Taglio piano yx .....	62
Figura 48–Momento flettente piano yx .....	63
Figura 49–Sforzo normale piano yz.....	64
Figura 50–Taglio piano yz.....	65
Figura 51–Momento flettente piano yz.....	66
Figura 52–Sforzo normale piano xz.....	67
Figura 53–Taglio piano xz.....	68
Figura 54–Momento flettente piano xz.....	69
Figura 55–Dcl puleggia Back Frame .....	70
Figura 56–Reazioni agenti sull'attuatore .....	71
Figura 57–Leg–Fisso .....	72
Figura 58–Leg–fisso: viste nello spazio .....	73
Figura 59–Reazioni Leg Fisso piano yx .....	73
Figura 60–Reazioni Leg–fisso piano xz .....	74
Figura 61–Riassunto dei risultati ottenuti nelle 4 campate .....	78
Figura 62–Reazioni Leg–fisso piano xz .....	80
Figura 63–Svincolamento portale .....	80
Figura 64–Momento flettente piano yx .....	83
Figura 65–Taglio piano yx .....	83
Figura 66–Sforzo normale piano yx.....	83
Figura 67–Sforzo normale piano xz.....	84
Figura 68–Taglio piano xz.....	85
Figura 69–Momento flettente piano xz.....	86
Figura 70–Sforzo normale piano yz.....	87
Figura 71–Taglio piano yz.....	87
Figura 72–Momento flettente piano yz.....	87
Figura 73–Dcl puleggia Leg Fisso.....	88
Figura 74–Leg Link.....	89
Figura 75–Leg–Link: viste nello spazio.....	90
Figura 76–Geometria preliminare Leg–Link.....	90
Figura 77–Reazioni Leg–Link piano yx.....	91
Figura 78–Reazioni Leg–Link piano xz.....	93
Figura 79–Reazioni Leg–Link piano yz.....	94
Figura 80–Sforzo normale piano yx.....	96
Figura 81–Taglio piano yx .....	97
Figura 82–Momento flettente piano yx .....	98
Figura 83–Sforzo normale piano xz.....	99
Figura 84–Taglio piano xz.....	100

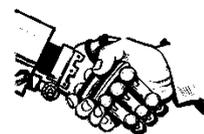


Figura 85–Momento flettente piano xz.....	101
Figura 86–Sforzo normale piano yz.....	102
Figura 87–Taglio piano yz.....	103
Figura 88–Momento flettente piano yz.....	104
Figura 89–Concept finale del dispositivo.....	110
Figura 90–Operatore+Exo in Posizione 0.....	111
Figura 91–Operatore+Exo in Posizione 1.....	111
Figura 92–Movimento di abduzione/adduzione concesso dal Leg–Link.....	112
Figura 93–Ingombro laterale+Giunti Leg–Link.....	112
Figura 94–Problematica riscontrata. Contatto stelo/puleggia.....	113
Figura 95–Schema e disegno 3D della potenziale soluzione.....	114
Figura 96–Tensioni Back Frame, Simulaz.1.....	116
Figura 97–Spostamento Back Frame,Simulaz.1.....	116
Figura 98–Tensioni Back Frame, Simulaz.2.....	117
Figura 99–Spostamento Back Frame,Simulaz.2.....	117
Figura 100–Tensioni Leg–Fisso, Simulaz.1.....	118
Figura 101–Spostamento Leg–Fisso,Simulaz.1.....	119
Figura 102–Tensioni Leg–Fisso,Simulaz.2.....	120
Figura 103–Spostamento Leg–Fisso,Simulaz.2.....	121
Figura 104–Tensioni leg–link,Simulaz. 1.....	122
Figura 105–Spostamento Leg–Link,Simulaz. 1.....	122
Figura 106–Tensioni Leg–Link,Simulaz.2.....	123
Figura 107–Spostamento Leg–Link,Simulaz.2.....	123
Figura 108–Modello matematico del Perno.....	126
Figura 109–Carichi esterni agenti sul perno nel piano yz.....	126
Figura 110–Suddivisione perno in sottotravi.....	127
Figura 111–Carichi esterni agenti sul perno nel piano xz.....	128
Figura 112–Taglio nel piano yz.....	129
Figura 113–Momento flettente piano yz.....	129
Figura 114–Taglio nel piano xz.....	130
Figura 115–Momento flettente piano xz.....	130
Figura 116–Perno +esploso dei giunti d'attacco.....	132
Figura 117–Testa a snodo con cuscinetto a doppia corona di sfere integrato.....	133
Figura 118–Dati Testa a snodo per Leg–Link.....	133
Figura 119–Dati Testa a snodo per Back Frame.....	133
Figura 120–Tirante ad occhio per Leg Fisso.....	134
Figura 121–Dati Tirante ad occhio per Leg–Fisso.....	134



## Abstract

L'ergonomia (dal greco 'ergon = lavoro' e 'nomos = legge'), fu definita dallo psicologo K.F.H Murrell nel 1949 come "disciplina scientifica interessata alla comprensione dell'interazione tra gli elementi di un sistema (umani e d'altro tipo) e la funzione per cui viene progettato (nonché la teoria, i principi, i dati e i metodi che vengono applicati nella progettazione). Ciò allo scopo di ottimizzare la soddisfazione dell'utente e l'insieme delle prestazioni del sistema."

L'importanza di tale dottrina è aumentata negli anni ed oggi rappresenta un aspetto essenziale in ambito progettuale. La salute dell'uomo e l'interfaccia dello stesso con l'ambiente lavorativo, diventano di primo interesse per ingegneri e anche per professionisti di altre discipline.

Obiettivo del seguente lavoro di tesi è l'analisi e la progettazione di un esoscheletro di tipo attivo atto a garantire i principi ergonomici sopra citati.

In particolare, lo studio si è focalizzato sulla realizzazione di un dispositivo in grado di dare sostegno durante il movimento di flessione/estensione del tronco eseguito da un operatore durante una giornata di lavoro.

Nella prima parte introduttiva si elencano alcuni esempi di esoscheletri presenti sul mercato e si introducono i concetti essenziali di anatomia utili al lettore per comprendere al meglio i successivi capitoli.

L'iter si suddivide poi in diverse sezioni: il primo capitolo illustra quelle che sono le fondamenta di tutto il progetto, viene trattato il principio di funzionamento, le ipotesi adottate, l'analisi cinematica e dinamica e le prove sperimentali come validazione delle premesse. La seconda sezione si focalizza sulla geometria della struttura, la definizione della corsa dell'attuatore, la scelta dello stesso e la determinazione della pressione necessaria per il corretto funzionamento del dispositivo.

Nei capitoli III, IV e V si descrivono le metodologie di progettazione adottate per il dimensionamento del back frame, del link fisso e del leg link con particolare attenzione ai punti critici di connessione tra gli elementi.

Il VI capitolo riassume la procedura di dimensionamento adottata per tutti gli elementi e i risultati numerici, presentando infine il concept finale del dispositivo. Il VII capitolo affronta i problemi riscontrati in fase di progettazione e le possibili soluzioni. L'VIII capitolo si concentra sull'analisi ad elementi finiti effettuata per i tre componenti strutturali, andando ad analizzare le possibili ottimizzazioni del caso. Nella nona e ultima sezione, si evidenziano le considerazioni finali e si delineano i prossimi sviluppi del progetto.



## Introduzione

*Nel prossimo capitolo si esplicitano tutte le considerazioni effettuate durante la fase di analisi e di progettazione del prototipo.*

*Si introducono alcuni concetti legati all' anatomia umana come la definizione degli assi e dei piani anatomici, la morfologia del giunto d' anca e la suddivisione della colonna vertebrale nelle sezioni interessate ai disturbi muscoloscheletrici.*

*Successivamente si citano e si analizzano brevemente i dispositivi attualmente presenti sul mercato, considerandone gli aspetti positivi e negativi.*

*Finalmente, si esporrà il caso in esame in maniera generica riassumendone gli aspetti principali che verranno ampiamente approfonditi nei capitoli dedicati.*

*Si è scelto di spendere alcune pagine introduttive per dare una visione più chiara al lettore e per testimoniare il percorso preliminare di ricerca effettuato durante il lavoro di tesi che ha permesso di giungere alla soluzione finale.*



## Anatomia di riferimento

In anatomia, per rendere semplice la descrizione e lo studio del moto del corpo umano, si sfrutta l'ausilio degli assi anatomici, linee immaginarie che attraversano il corpo umano in tre differenti direzioni passando attraverso il baricentro.

Gli assi principali sono:

- **Asse trasversale:** asse orizzontale che attraversa il corpo da sinistra verso destra ed è parallelo al suolo. Lungo questo asse si eseguono piegamenti e distensioni.
- **Asse longitudinale:** asse verticale che attraversa il corpo dalla testa ai talloni. Attorno a questo asse si possono eseguire movimenti di torsione e di rotazione.
- **Asse sagittale:** linea immaginaria che oltrepassa il corpo umano dal ventre al dorso. I movimenti permessi sono quelli di abduzione e adduzione.

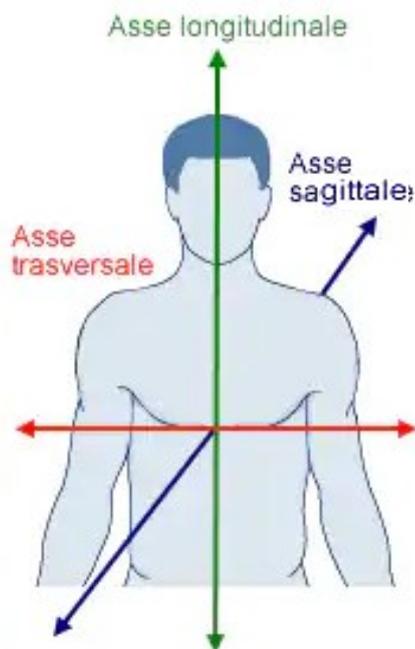
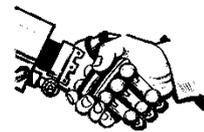


Figura 1-Assi del corpo umano



L' intersezione tra 2 degli assi citati genera un piano anatomico.  
Anche per i piani si definisce una tripla suddivisione:

- **Piano sagittale:** è un piano individuato dall' intersezione tra l' asse sagittale e longitudinale. Divide il corpo in parte destra e parte sinistra. Viene definito asse di simmetria.
- **Piano frontale:** individuato dall' intersezione tra asse longitudinale e trasversale. Divide il corpo in parte anteriore e parte posteriore.
- **Piano trasversale:** nasce dall' intersezione tra asse sagittale e trasversale. Divide il corpo in parte superiore e parte inferiore.

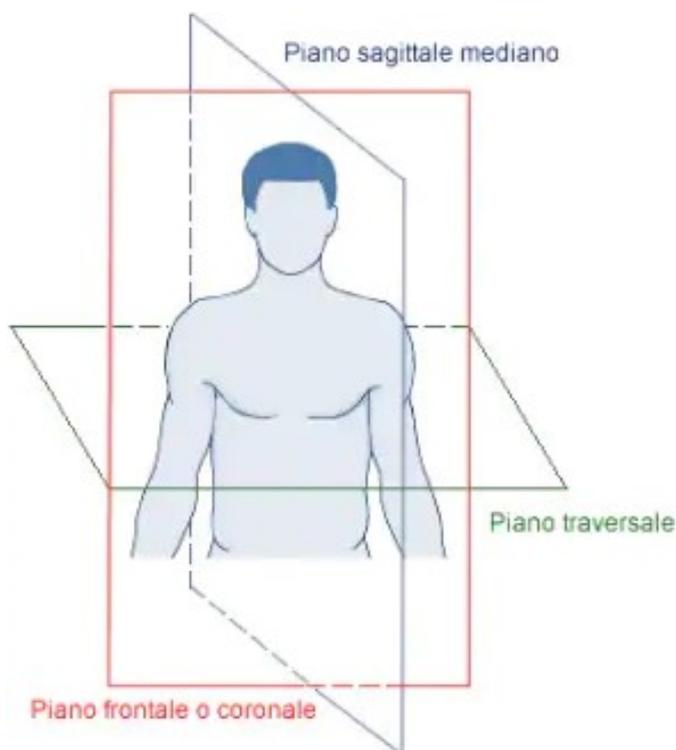


Figura 2-Piani del corpo umano.

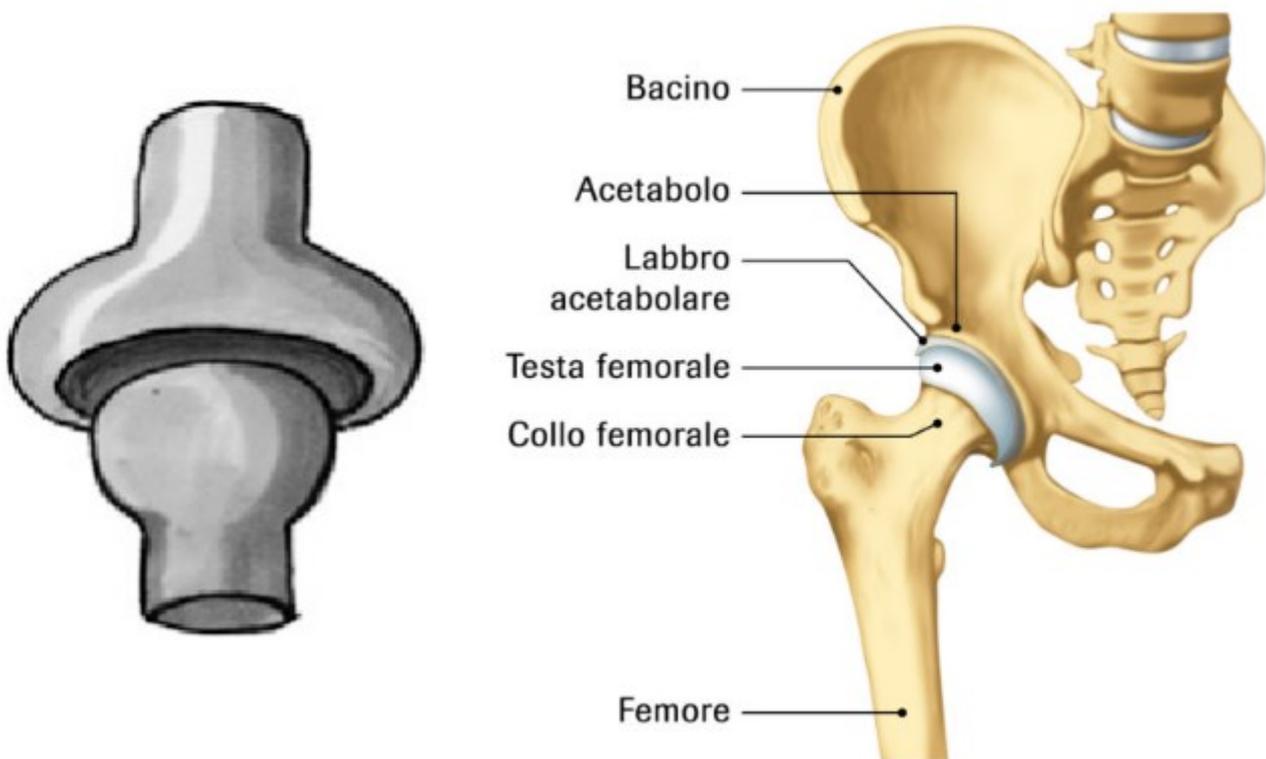


## *L' importanza dell' anca*

*L' articolazione dell' anca oltre ad essere estremamente essenziale per il corpo umano in quanto sostiene il peso corporeo e subisce le forze di compressione delle gambe durante il moto, costituisce una certa importanza anche per il progetto. È l' elemento di collegamento tra gli arti inferiori e il tronco. Tra i movimenti permessi si citano:*

- 1. Movimento di flessione/estensione*
- 2. Movimento di adduzione/abduzione*
- 3. Movimento di rotazione interna/esterna*

*Anche detta enartrosi, l' anca può essere modellizzata come un giunto sferico e proprio sulla base di questo sono state effettuate delle considerazioni che hanno portato a specifiche scelte progettuali che saranno descritte e illustrate in seguito.*



*Figura 3-Schema anca e modello del giunto*



## La colonna vertebrale: breve rimando

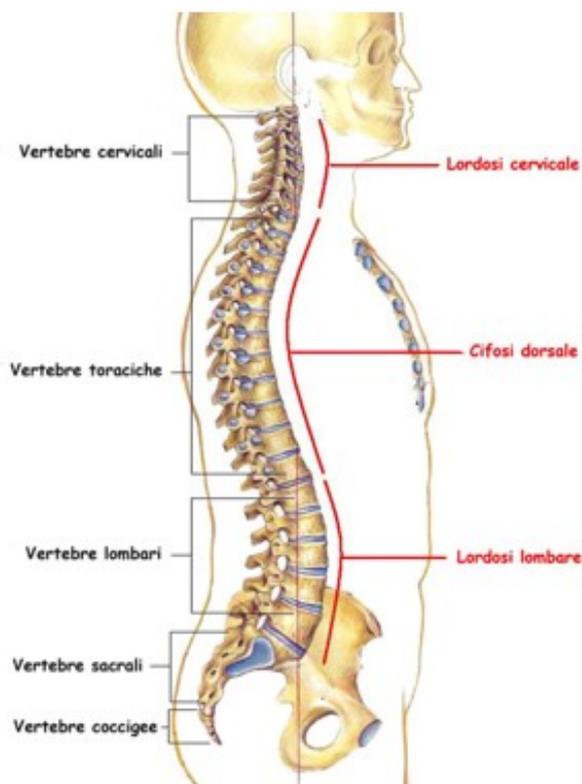
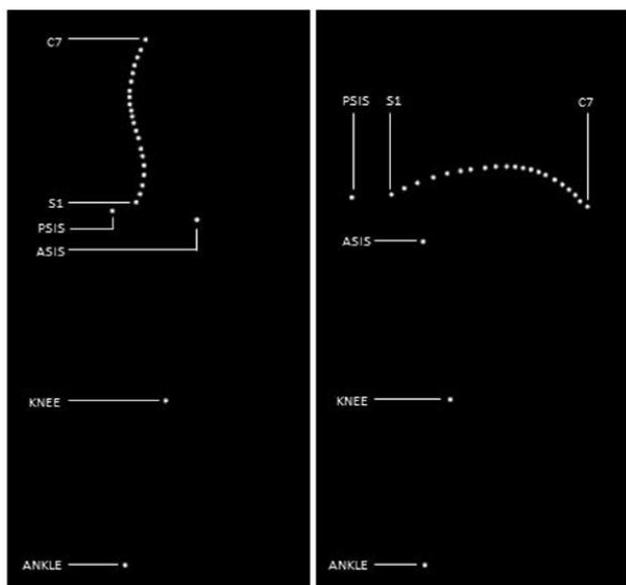


Figura 4-Distribuzione delle vertebre due: fornire protezione al tratto sacrale del midollo spinale e supportare il peso della parte superiore del corpo umano, quando un individuo si alza in piedi, cammina, corre ecc..

5. Vertebre coccigee: è l'ultimo segmento della colonna vertebrale ed è formato da 4 a 6 segmenti fusi tra loro, che però non presentano le normali caratteristiche delle vertebre.



K. Huysamen tramite analisi sperimentali ha rilevato un allungamento della colonna vertebrale, compreso tra 29.9mm-66,7 mm, non legato all'angolo di flessione effettuato.

Tale allungamento sarà considerato nelle fasi successive, ottimizzando il dimensionamento per evitare disagi all'operatore durante la giornata lavorativa.

Figura 5-Analisi sperimentale K.Huysamen relativo all'allungamento della colonna vertebrale



## Il problema di oggi

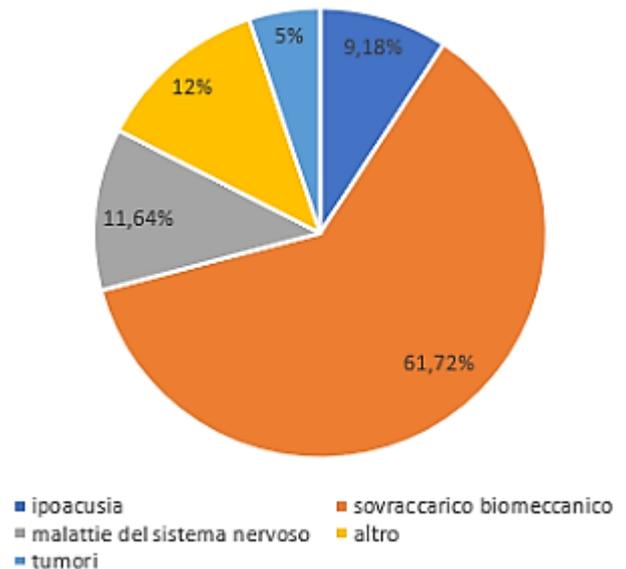
Malattie e disturbi muscoloscheletrici da sovraccarico biomeccanico (in sigla “DMS”) sono assai diffusi tra lavoratrici e lavoratori e costituiscono una delle principali cause di assenza per malattia in molte attività. Quasi il 25% dei lavoratori dell’Unione europea soffre di mal di schiena e il 23% lamenta dolori muscolari. In Italia, secondo alcune stime epidemiologiche, almeno cinque milioni di lavoratori svolgono abitualmente attività lavorative che prevedono la movimentazione manuale di carichi. Nel periodo 2005–2009 i casi di DMS denunciati all’INAIL sono stati: 7.926 nel 2005 e 16.593 nel 2009, con un trend di netta crescita. I DMS non sono un rischio inevitabile. I datori di lavoro e gli stessi lavoratori possono contribuire a prevenire o comunque a ridurre in buona parte molti di questi problemi applicando ed osservando le norme vigenti in materia di salute e sicurezza e seguendo le indicazioni e le soluzioni disponibili per prassi lavorative corrette che evitino questi rischi. Il grafico a torta testimonia come una grossa fetta dei disturbi sul campo di lavoro sia legato al sovraccarico biomeccanico.

La meccanizzazione/automazione dei processi potrebbe essere una soluzione per ridurre/contenere i DMS. Ad esempio il ricorso al carrello elettrico, è sempre da preferire al carrello normale in caso di merci molto pesanti e ingombranti, oppure, per evitare il trasporto su scale, è bene usare elevatori (piattaforme, carrelli elevatori, montacarichi). Considerando che i tempi produttivi richiesti dalle aziende debbano essere sempre più competitivi, l’ esigenza di ottimizzare i processi fa sì che la capacità umana di osservare, decidere ed eseguire azioni adeguate in frazioni di secondo è necessaria.

Si decide quindi di dotare l’ uomo di un dispositivo indossabile, capace di supportarlo durante l’ intera giornata lavorativa e di aiutarlo a ridurre i disturbi muscolo–scheletrici. Tale dispositivo è l’ ESOSCHELETRO.

Tale dispositivo innovativo può essere identificato come un’ estensione dello scheletro biologico, una struttura progettata per essere applicata in differenti campi. Lo si trova in diverse forme e diversi materiali.

Il loro utilizzo è molto diffuso in ambito medico per favorire sostegno a soggetti affetti da disturbi nella deambulazione. Non è da meno l’ utilizzo in campo militare, con lo scopo di potenziare le prestazioni del soldato e dotarlo di una struttura resistente. Nel prossimo paragrafo si andranno a classificare gli esoscheletri ed illustrare alcune loro applicazioni presenti sul mercato.



INAIL 2012-2017

Figura 6-Grafico a torta Inail su situazione DMS



## Tipologie di esoscheletri

In base allo scopo per cui devono essere applicati, possiamo differenziare gli esoscheletri in:

**Attivi**: sono alimentati da batterie o possiedono collegamenti elettrici per far funzionare motori o attuatori. Vengono utilizzati quando le tensioni in gioco sono molto elevate e per fornire un azionamento.

**Passivi**: non hanno alcuna fonte di energia elettrica e possono essere utilizzati per la ridistribuzione del peso (molle e meccanismi di bloccaggio deviano il peso di un oggetto intorno all'utente e nel terreno) o per catturare energia (gli esoscheletri del giunto d'anca a molla hanno dimostrato di migliorare l'efficienza della deambulazione, mentre gli esoscheletri del ginocchio a molla dinamica possono essere utilizzati per caricare una batteria).

**Ibridi**: gli esoscheletri ibridi sono indossabili e sono dotati di tutti i controller e i sensori di un esoscheletro alimentato ma utilizzano la FES (stimolazione elettrica funzionale) dei muscoli come attuatori.

Possiamo anche classificarli in base ai gradi di libertà concessi all' uomo. Dunque avremo esoscheletro di tipo antropomorfo, quasi antropomorfo, e non antropomorfo.

**Antropomorfo**: si allinea perfettamente e meccanicamente con il corpo umano, consentendo tutti i gradi di libertà all' uomo.

**Quasi-antropomorfo**: emula i movimenti dell' uomo, gli assi di rotazione dei giunti non sono perfettamente allineati con quelli umani.

**Non antropomorfo** : atta a ridurre l'impatto dei carichi esterni sull'uomo.

Infine si possono suddividere anche in base alla parte del corpo da supportare: arti inferiori, superiori, inferiori e superiori o a giunto singolo.



## Campi applicativi

Dalla recensione effettuata nel 2015 da M.P.de Looze è emerso che la maggior parte degli articoli pubblicati sugli esoscheletri per applicazioni industriali è datata 2010. Nell'ultimo decennio, l'interesse per gli esoscheletri utilizzabili sul posto di lavoro è cresciuto esponenzialmente, non poche case costruttrici infatti hanno investito in tale tecnologia innovativa.

Tuttavia, la ricerca ha interessato anche il campo medico e militare. Per ciò che riguarda il primo, gli esoscheletri hanno scopi terapeutici/riabilitativi in cui i dispositivi sono chiamati a sostenere le persone fisicamente deboli, ferite o disabili.

Per le applicazioni militari invece, l'obiettivo è il sollevamento e il trasporto di carichi pesanti.

Al fine di avere una panoramica complessiva per ciò che concerne lo stato dell'arte degli esoscheletri, nella sezione successiva ne elencheremo ed esamineremo alcuni.

La maggior parte degli esoscheletri e dei dispositivi esaminati sono in fase sperimentale e non pronti per essere utilizzati nella pratica.

L'immagine seguente, vuole riassumere visivamente tutte le possibili applicazioni, alcune già relizzate altre in fase di studio.

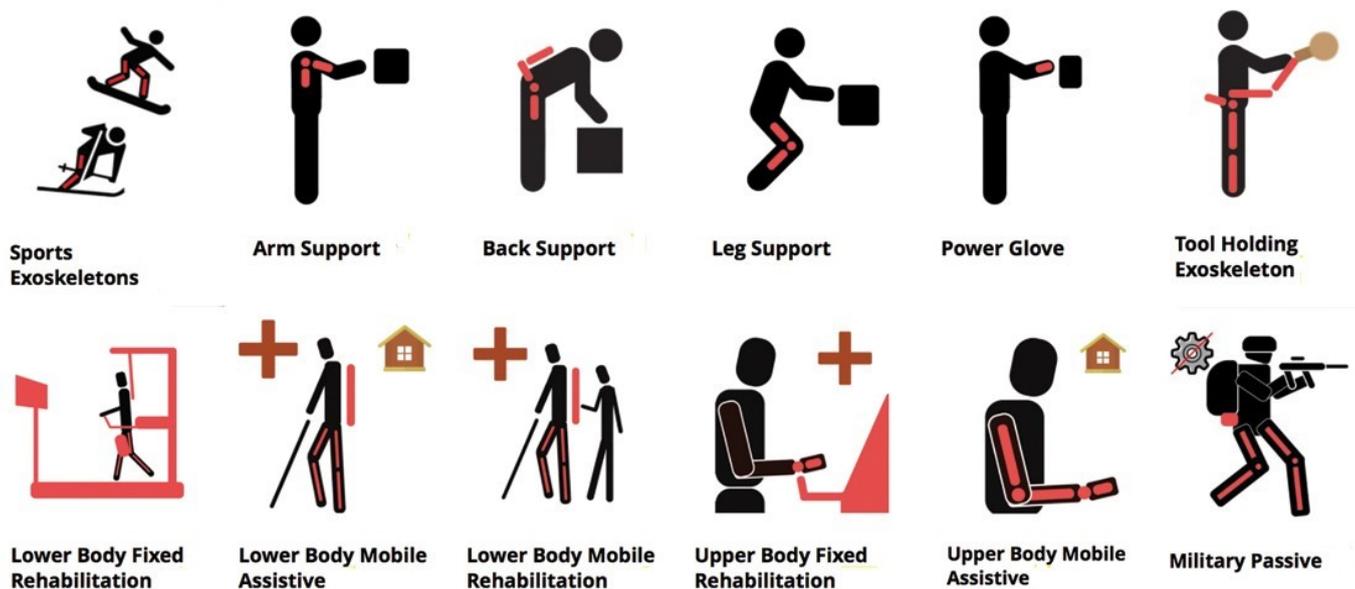
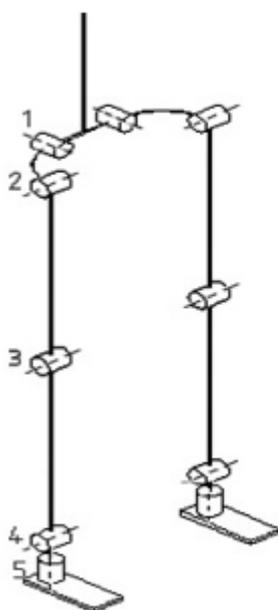


Figura 7- Campi di applicazione esoscheletro



## Esoscheletri presenti sul mercato o in fase di studio



L' esoscheletro raffigurato è una struttura attiva utilizzata in ambito medico per la deambulazione. Il sistema pensato da N. Koceska, presenta 10 gradi di libertà e permette al paziente tutti i movimenti necessari per recuperare l' andatura corretta. Come mostra la figura, per poter controllare i movimenti delle articolazioni dell' anca e del ginocchio sono presenti quattro attuatori pneumatici con stelo a doppio effetto, comandati da due valvole proporzionali.

La sezione di spinta all' interno degli attuatori è pari a  $\varnothing = 32 \text{ mm}$  e si sviluppa una forza di circa  $700 \text{ N}$  con una pressione di alimentazione pari a  $9 \text{ bar}$ .

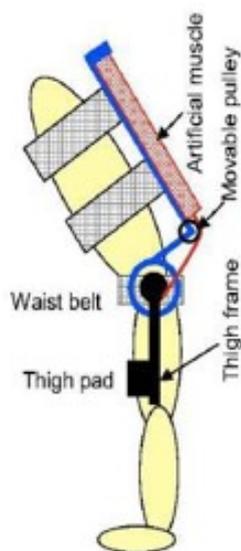
La struttura esoscheletrica è stata realizzata in alluminio  $6082 \text{ T6}$  ( $\sigma_y = 200 \text{ MPa}$ ) per garantire una certa rigidezza.

Il sistema di controllo applicato è di tipo fuzzy con un compensatore di forza aggiuntivo.

Figura 8-Dispositivo pensato da N.Koceska

L' utilizzo di potenziometri rotazionali permette di riconoscere gli angoli di rotazione dell' anca e del ginocchio durante il moto.

Dalle prove sperimentali si è ottenuto durante la deambulazione, un errore di posizionamento massimo dei cilindri di  $5/6 \text{ mm}$ , tollerabile per gli scopi desiderati.



Il dispositivo sviluppato da Y. Muramatsu, denominato MUSCLE SUITS, aiuta l'uomo a sollevare carichi tramite i muscoli artificiali.

La struttura è quindi attiva, costituita da quattro attuatori, due pulegge e due paracoscia con la funzione di fornire una contro-reazione durante il sollevamento della parte superiore del corpo.

L' attuttore genera una coppia attorno al giunto d' anca e permette all' operatore di sollevare i carichi.

La coppia massima fornibile dal sistema, è pari a:

Figura 9-Muscle Suits



$$C_{Muscle Suits} = F_{McKibben} \cdot n^{\circ} \cdot R_{puleggia} = 1500 \cdot 4 \cdot 0.02 = 120 Nm$$

Con tale valore di coppia si riduce lo sforzo in fase di sollevamento del carico di circa il 40 %.

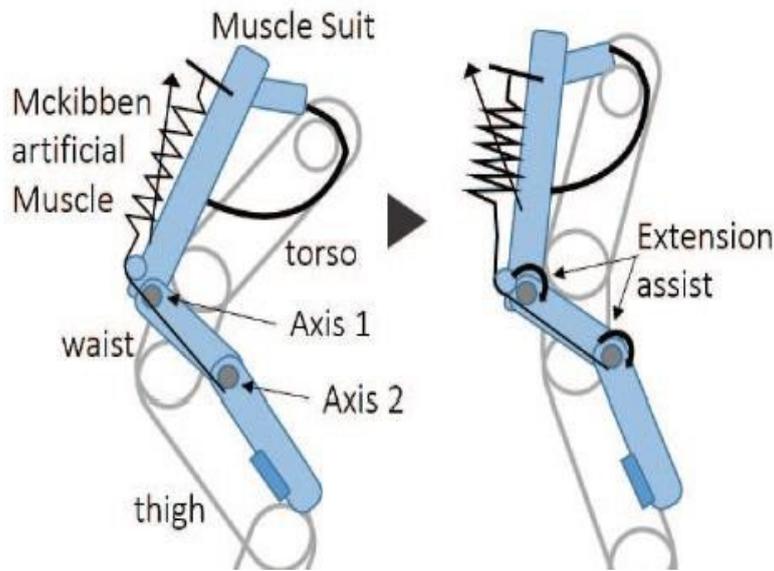


Figura 10-Muscle Suits con interruttori tattili

T. Ito per favorire gli infermieri nell'assistenza di persone anziane, progettò il dispositivo raffigurato a sinistra. Suddivise l'articolazione dell'anca in due parti distinte per consentire i movimenti naturali durante il suo utilizzo. L'alimentazione dei muscoli artificiali, in questo caso, avviene tramite interruttori tattili o di espirazione essendo le mani impegnate a garantire sostegno per le persone anziane. Sono stati riscontrati problemi per quanto riguarda il controllo del movimento.

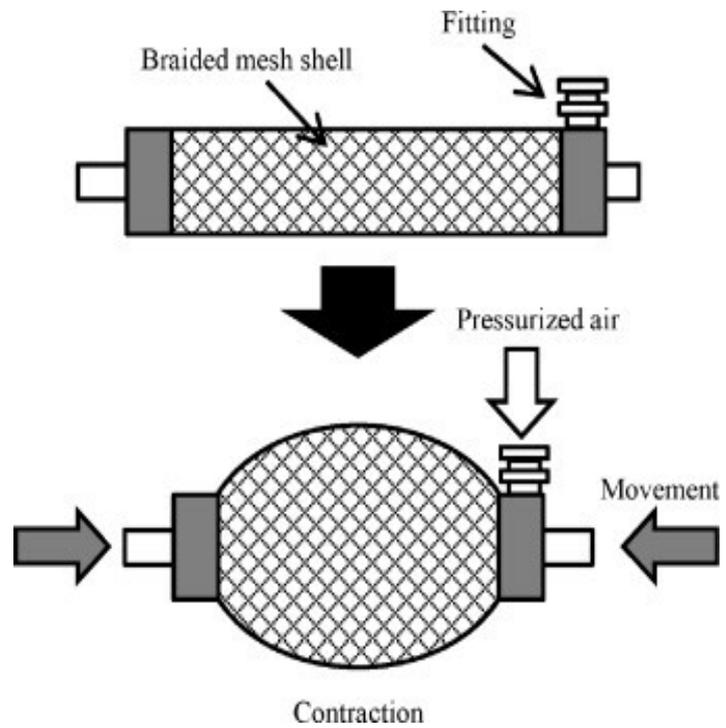


Figura 11-Schema Muscoli McKibben

I muscoli artificiali McKibben sono costituiti da una camera elastomerica cilindrica vuota ricoperta da un manicotto intrecciato, costituito da fibre in materiale non estensibile e disposte in una configurazione elicoidale anti-simmetrica. La camera interna e il manicotto sono sigillate e fissate ai raccordi rigidi, i quali presentano un passaggio per pressurizzare la camera elastica. L'energia viene trasferita ad un sistema esterno attraverso questi terminali. A seconda dell'angolo delle fibre, l'attuatore è in grado di estendersi e contrarsi, e modificando l'angolo iniziale tra le fibre, si riesce ad ottenere una rigidità variabile in ogni punto lungo la corsa. Tipiche pressioni di esercizio vanno da 1-5 bar.



Figura 12-Esoscheletro Cyberdryne

Il sistema a sinistra denominato HAL di CYBERDYNE, è un dispositivo indossato all'anca in grado di fornire assistenza di coppia al corpo e/o trasferire il carico direttamente a terra. In un sistema che trasferisce il carico a terra, il peso di un utensile pesante/oggetto è parzialmente supportato dalla struttura. Poiché il dispositivo è alimentato a batteria, può essere utilizzato in vari luoghi senza restrizioni d'uso. Grazie all'aggiunta di funzioni impermeabili e antipolvere, il dispositivo può essere utilizzato in lavori pesanti all'aperto che gravano sulla regione lombare.



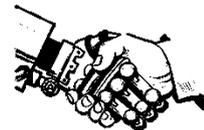
Figura 13-Esoscheletro HERCULE

Dotato di attuatori a cavo elettrico di ultima generazione, HERCULE garantisce un funzionamento eccezionalmente fluido e un'elevata efficienza energetica.

L'autonomia è rinforzata e permette di lavorare almeno 4 ore. È un esoscheletro pensato per il trasporto e la manipolazione di carichi e strumenti.

Permette di camminare in piano o su pendii fino a 10° , salire le scale, piegarsi in posizione accovacciata o seduta. Un HMI (interfaccia uomo-macchina) ergonomico aiuta a selezionare 2 modalità per un uso semplice:

- Dress/Undress è la modalità che viene utilizzata per adattarsi all'attrezzatura
- Action è la modalità attiva che permette di iniziare con l'assistenza di forza per tutte le applicazioni.



*L' esoscheletro Laevo è un dispositivo passivo che riduce l' attività muscolare nella parte inferiore della schiena.*

*Tale dispositivo è costituito da tre tipologie di imbottiture: due pettorali, una posteriore e due per le gambe.*

*Il funzionamento si basa sul trasferimento delle forze dalla parte bassa della schiena alle imbottiture del torace e delle gambe.*

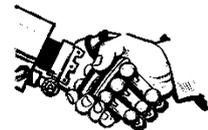
*Dagli studi effettuati di T. Bosch è stata rilevata una minore attività muscolare e un minore disagio nella regione lombare quando veniva indossato l'esoscheletro.*

*In seguito a tale diminuzione, il tempo di resistenza dell' operatore è stato triplicato.*

*Inoltre, sono state riscontrate alcune problematiche dovute all' interfaccia tra la struttura e l' uomo, in particolare alle ginocchia, imposte dalla struttura in maniera troppo estesa.*

*Lo studio effettuato conclude con una preoccupazione legata al design e alla progettazione degli esoscheletri con una possibile limitazione nell' applicazione di essi nel campo industriale riguardante il disagio da parte dei lavoratori nell' indossare tale dispositivo.*

*Figura 14-Esoscheletro LAEVO*



## *Aspetti da risolvere*

*La ricerca nell' ambito della robotica collaborativa sta prendendo sempre più piede con il passare degli anni e come abbiamo visto influenza diversi campi. Tuttavia, gli studi effettuati e le pubblicazioni presenti sono principalmente focalizzate sugli aspetti tecnici e meccanici dell' esoscheletro.*

*Alcuni esponenti come Viteckova, Kutilek, e Jirina (2013) concludono nei loro trattati tecnici che, nonostante i notevoli progressi, c'è ancora la necessità di sviluppare esoscheletri leggeri compatibili con gli operatori.*

*In ambito lavorativo i rischi legati all' utilizzo di tali dispositivi riguardano il loro design e la loro funzionalità. A seconda della costruzione e del peso, i lavoratori possono essere limitati nella loro naturale libertà di movimento. Si devono inoltre considerare possibili collisioni tra un esoscheletro e attrezzature di lavoro, robot o macchinari.*

*Occorre valutare che potrebbero verificarsi punti di pressione nelle aree in cui l' esoscheletro è attaccato al corpo, causata ad esempio dalle cinghie o cinture, oppure irritazione della pelle dovuta all' attrito o alle reazioni allergiche.*

*I dispositivi attivi risentono maggiormente di queste problematiche perché meccanicamente più complessi e più pesanti, e ciò rende più stimolante la progettazione.*

*Indossare esoscheletri può anche portare alla condanna sul posto di lavoro in quanto potrebbe dar modo di pensare che l' operatore sia dipendente dal supporto per poter eseguire un compito specifico.*

*Un ulteriore aspetto da considerare è legato alla legislazione di tali dispositivi. Non esistono infatti ad oggi norme internazionali che favoriscano la loro applicazione industriale in sicurezza e ciò frena la loro realizzazione e diffusione.*

*La conoscenza di tali aspetti e dello stato dell' arte precedentemente citato, ha permesso di impostare il seguente studio con l' obiettivo di realizzare un dispositivo che rientri il più possibile nelle specifiche richieste.*



## *Il caso studio*

*Si è partiti da un concetto di esoscheletro che fosse in grado di emulare nella maniera più vicina alla realtà, tutti i movimenti che sono inclusi nella flessione/estensione del tronco e che vengono compiuti inconsciamente dall' uomo evitando quindi eventuali impedimenti.*

*La tipologia di esoscheletro rientra nei dispositivi considerati "attivi" in quanto alimentato da due attuatori pneumatici che fanno da motore e costituito da un sistema di rinvio composto da funi e pulegge.*

*A differenza di altri dispositivi attivi utilizzati maggiormente per soggetti con deficit nella locomozione, si è accettata la sfida di progettare un esoscheletro dello stesso tipo per persone normodotate.*

*Considerando che l' anca corrisponde ad un' articolazione essenziale per l' esecuzione corretta del movimento in esame ed affinché ci fosse assistenza, si è ritenuto opportuno generare una coppia di supporto agente in corrispondenza del giunto d' anca e scaricare la coppia di reazione sulle cosce attraverso un adeguato para-coscia.*

*Si è scelto di progettare l' esoscheletro in modo che erogasse una coppia di assistenza pari al 30% della coppia complessiva che i muscoli in assenza di una struttura esterna compirebbero.*

*Il motivo di tale percentuale risiede nel fatto di non voler eliminare totalmente il contributo muscolare in fase di piegamento, semplicemente dare un supporto.*

*Nel corso del progetto si terrà particolare attenzione al peso complessivo della struttura poiché l' operatore dovrà indossare il prototipo per l' intera giornata lavorativa.*



## CAPITOLO I

### Analisi preliminare

Nel seguente capitolo verranno esposte tutte le analisi preliminari da cui si è partiti per realizzare il progetto finale.

In particolare verranno analizzati i seguenti punti:

- Concetto base di funzionamento dell' esoscheletro
- Ipotesi semplificative
- Confronto tra legge teorica del moto e legge ricavata da prova sperimentale
- Cinematica e Dinamica 2D del dispositivo

#### Concetto base di funzionamento dell' esoscheletro

L' esigenza di utilizzare un esoscheletro nasce, come abbiamo precedentemente visto, per moderare lo sforzo muscolare che un operatore compie in fase di flessione ed estensione del tronco. Si tratta di generare una "coppia artificiale" che assiste i muscoli sacrospinali ed addominali, responsabili del movimento di piegamento del busto in avanti e indietro.

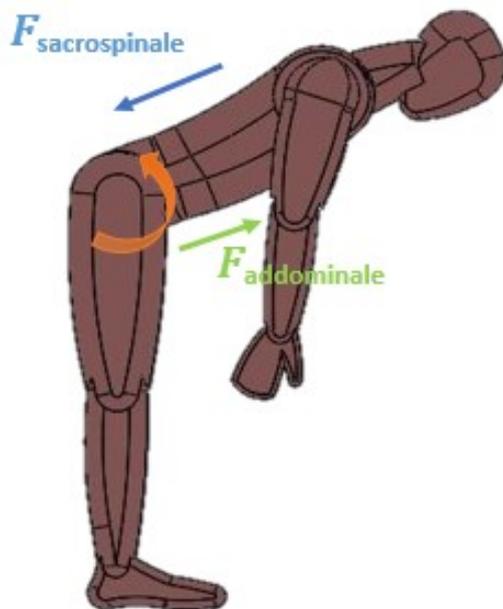


Figura 15-Tensioni muscolari e coppia

Generare una coppia nell' intorno del giunto d' anca attraverso una struttura esterna al corpo umano è sicuramente utile per il benessere dell' operatore che ridurrà il contributo tensionale dei suoi muscoli.

Si rappresentano in figura le direzioni delle tensioni muscolari e il verso della coppia di supporto.

L' esoscheletro sarà indossato come se fosse uno zaino da trekking. Gli spillacci collegano il busto dell' utente con l' elemento mobile dell' esoscheletro, mentre la cintura imbottita (chiusa in corrispondenza del bacino) sarà l' attacco dei due elementi inferiori della struttura.

Durante la giornata lavorativa, l' utente sarà costantemente collegato alla linea di distribuzione d' aria in modo da alimentare i due cilindri pneumatici a

doppio effetto fissati su una struttura rigida e controllati da una valvola 5/3. La trasmissione della coppia di assistenza è resa possibile da una fune metallica che è collegata per un' estremità allo stelo dell' attuatore e per l' altra ad un paracoscia, elemento necessario per scaricare la tensione dei bicipiti femorali in fase di flessione del tronco. La tensione del filo è resa uniforme attraverso pulegge di rinvio posizionate sia sull' elemento mobile della struttura che sull' elemento fisso.



L' immagine evidenzia il comportamento del dispositivo durante il suo completo movimento (flessione/estensione).

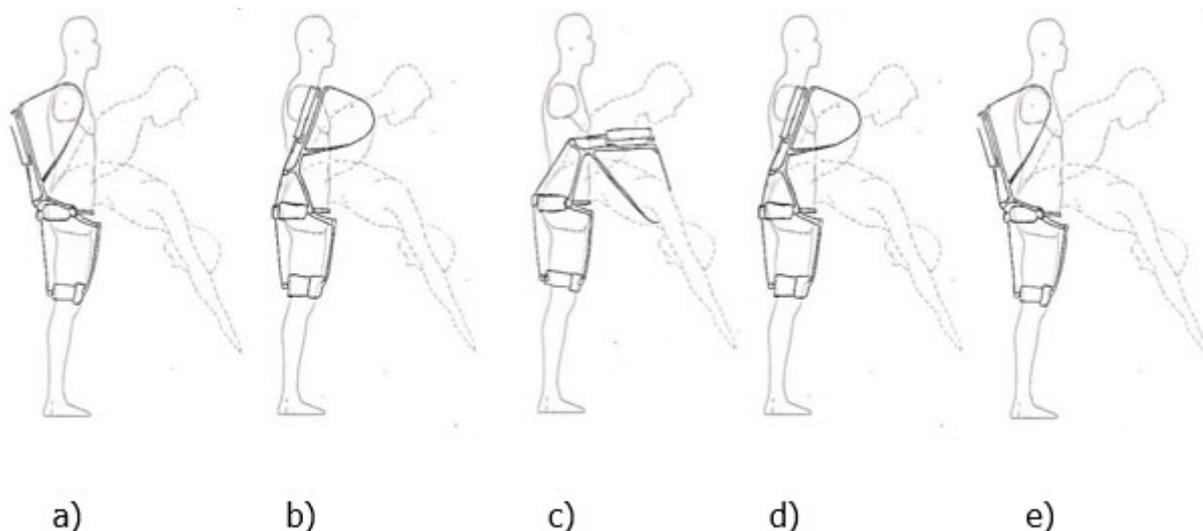


Figura 16-Successione posizioni assunte dall'operatore

Quando l' operatore è in posizione eretta, lo stelo è completamente all' interno del cilindro. Durante il piegamento, la puleggia collegata all' elemento mobile scorre sul filo tenendolo in tensione e lo stelo fuoriesce dall' attuatore.

Alimentando gradualmente la camera anteriore dell' attuatore, si assiste l' utente in tutta la sua fase di flessione con un valore di coppia crescente. Il boost di coppia si raggiunge nel momento in cui l' operatore resta piegato. In figura vengono mostrate le posizioni iniziali e finali oggetto di studio.

Nonostante il funzionamento possa sembrare molto semplice è stato necessario effettuare delle ipotesi che permettessero di modellare il meccanismo nella maniera più lineare possibile. Vengono dunque trattate nel paragrafo seguente tutte le semplificazioni effettuate.

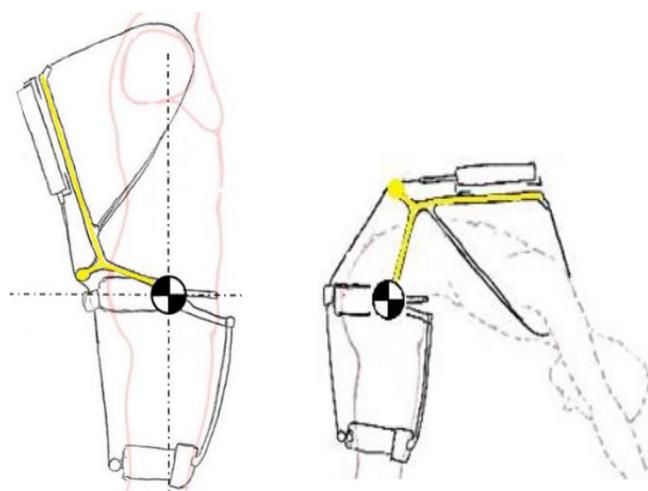


Figura 17-Posizione di piegamento massimo



### *Ipotesi semplificative*

*Considerare la molteplicità delle variabili anatomiche in fase di flessione del tronco risultava complicato, si è deciso quindi di semplificare l'analisi effettuando le seguenti ipotesi di lavoro:*

- *Moto di flesso/estensione del tronco solo nel piano sagittale mantenendo le gambe tese. (Successivamente tale ipotesi sarà superata ammettendo una piccola oscillazione degli arti inferiori)*
- *Scelta della legge cicloidale come legge più idonea a rappresentare le fasi di discesa e risalita del tronco*
- *Angolo di piegamento massimo compiuto dall'operatore pari a  $60^\circ$  svolti in 1 secondo per fase*

*Attraverso prove sperimentali tenutesi in laboratorio è stato possibile validare tali ipotesi. In particolare è stata analizzata la flessione e l'estensione del tronco in diverse condizioni di movimento applicando degli accelerometri in corrispondenza della caviglia, del centro d'anca e del trapezio.*

*Tramite una scheda Arduino è stato possibile memorizzare il segnale inviato dai sensori per tutta la durata della prova. Successivamente i dati registrati dalla scheda sono stati interpretati dal software MATLAB che ha permesso di ricavare gli andamenti sperimentali. Nel prossimo paragrafo verrà descritta nel dettaglio la prova eseguita.*



## Analisi sperimentale del moto di flessione–estensione del tronco

L' analisi sperimentale è stata affrontata effettuando 4 piegamenti di flessione del tronco per ogni condizione di lavoro:

- Piegamento normale
- Piegamento mantenendo le ginocchia tese
- Piegamento a step
- Piegamento con schiena diritta.

Qui di seguito vengono riportate le immagini nelle due posizioni oggetto di studio.

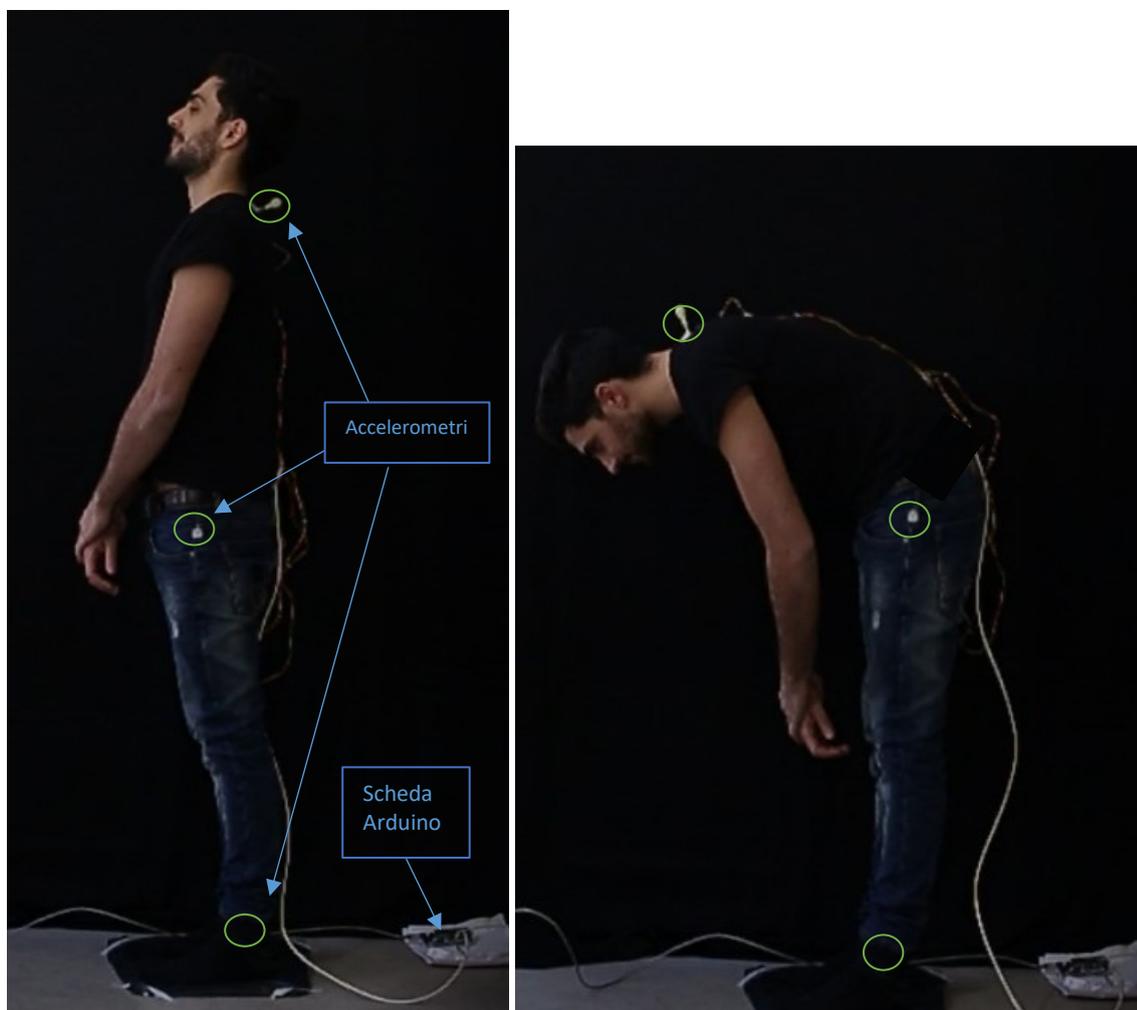
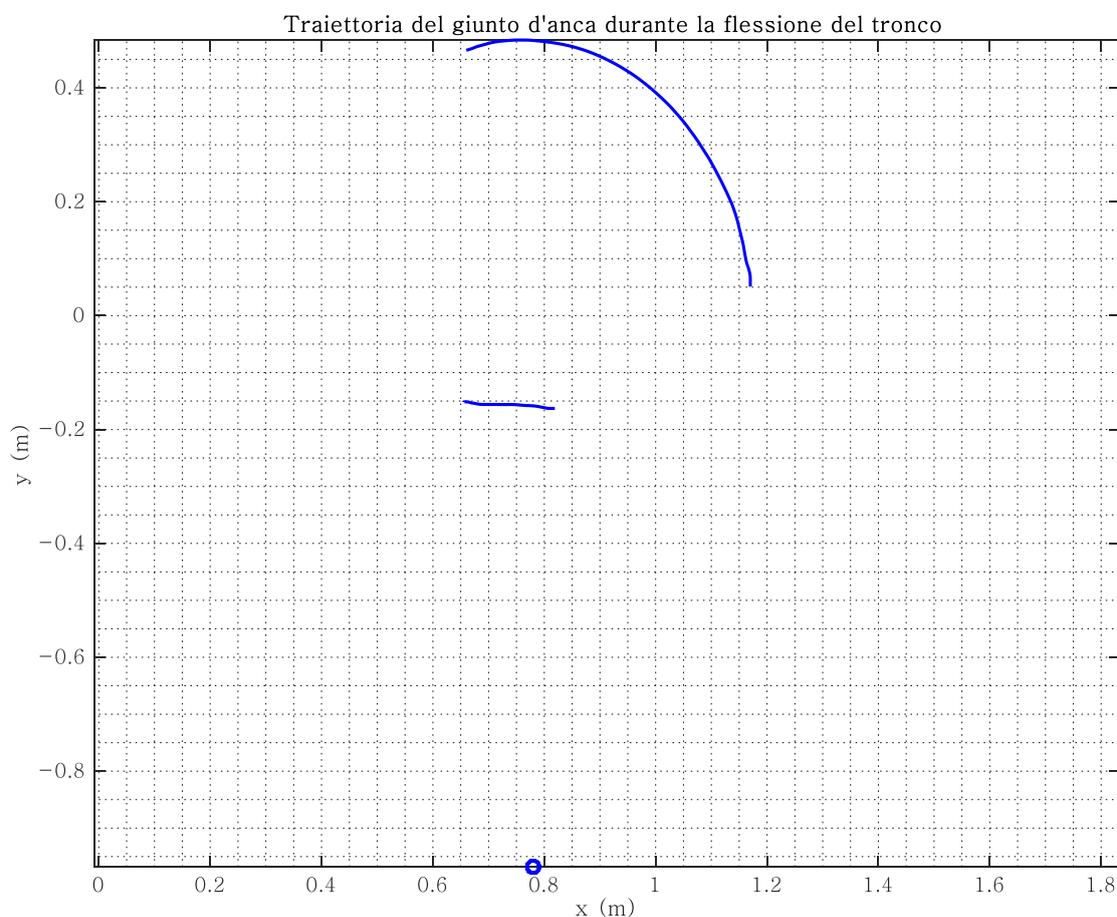


Figura 18-Prova sperimentale effettuata in Laboratorio

La prova è durata 34 secondi e ha generato i risultati mostrati qui di seguito. La scheda riceve in input il segnale degli accelerometri e manda al PC (non visibile in figura) l' output che verrà successivamente elaborato dal software MATLAB con cui è stato possibile ricavare dei trend interessanti.



*Figura 19-Traiettoria ottenuta dai markers dopo la prova*

*Il grafico mostra la traiettoria dei markers ottenuta a seguito della prova. In particolare si nota un andamento pressoché lineare del centro d' anca rispetto a quello relativo del tronco. Il marker puntuale invece, testimonia il fatto che il fulcro del movimento è costituito dalla caviglia.*

*L' applicazione dei 3 accelerometri ha permesso inoltre di ottenere in funzione del tempo gli andamenti dello spostamento angolare, della velocità e dell' accelerazione del tronco.*

*Si riporta nel seguente paragrafo l' andamento risultante messo a confronto con l' andamento teorico della legge cicloidale.*



## Confronto tra legge cicloidale e andamento sperimentale

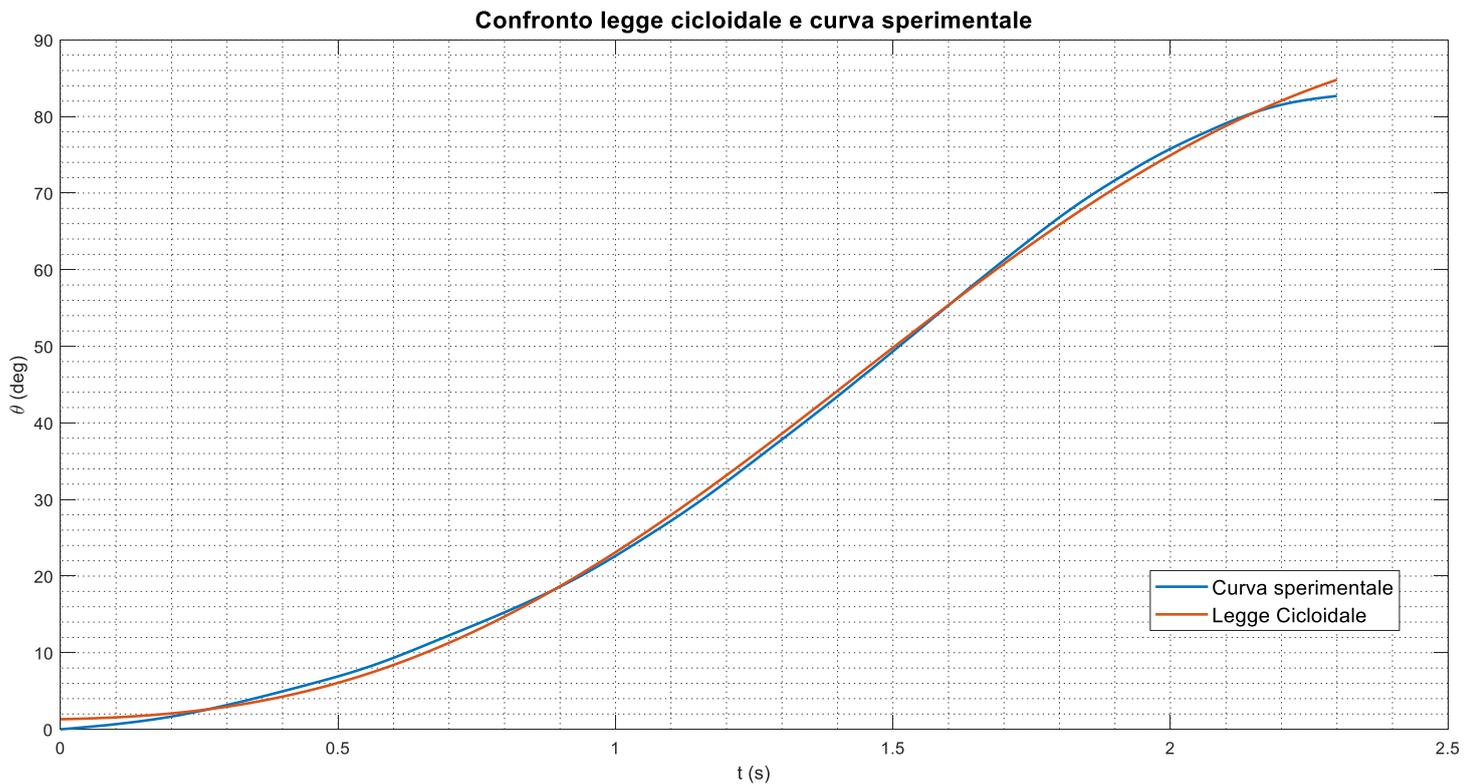


Figura 20-Confronto cicloidale teorica/sperimentale

Il trend mostra la validazione tra le ipotesi effettuate e le prove eseguite in laboratorio. Si nota facilmente che l'andamento sperimentale segue bene l'andamento teorico, dimostrazione del fatto che la legge scelta per modellizzare il movimento è coerente con il movimento compiuto dall'uomo. Tale coerenza la si ottiene per tutte le condizioni di lavoro sopracitate. Prima di affrontare il paragrafo relativo alla cinematica e dinamica del dispositivo e descrivere tutte le grandezze ricavate, è opportuno introdurre i dati antropometrici da cui si è partiti per ricavare le geometrie del dispositivo.



## Dati antropometrici

Nell'ottica di adattare l'esoscheletro ad utenti aventi caratteristiche morfologiche differenti, è stato necessario parametrizzare le lunghezze anatomiche in funzione dell'altezza e del peso dell'uomo.

I dati antropometrici presi in considerazione sono relativi al 95 percentile (significa che il 95% del campione è al di sotto di tale valore).

Dunque, il modello di uomo scelto per determinare le lunghezze ha un'altezza pari a:

$$h_{uomo} = 1.85 \text{ m}$$

e una massa pari a:

$$m_{uomo} = 95 \text{ Kg}$$

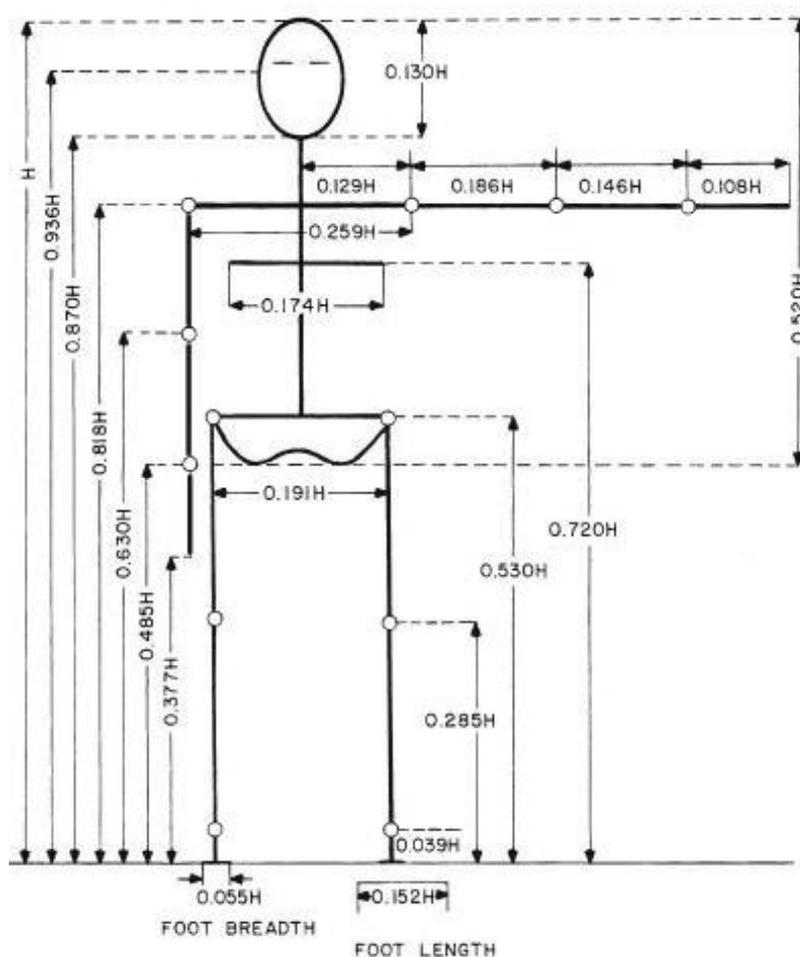


Figura 21-Dati parametrici in funzione dell'altezza

A questo punto è possibile passare alla trattazione relativa all'analisi cinematica e dinamica del dispositivo.



## Analisi Cinematica e Dinamica del dispositivo

- Cinematica.

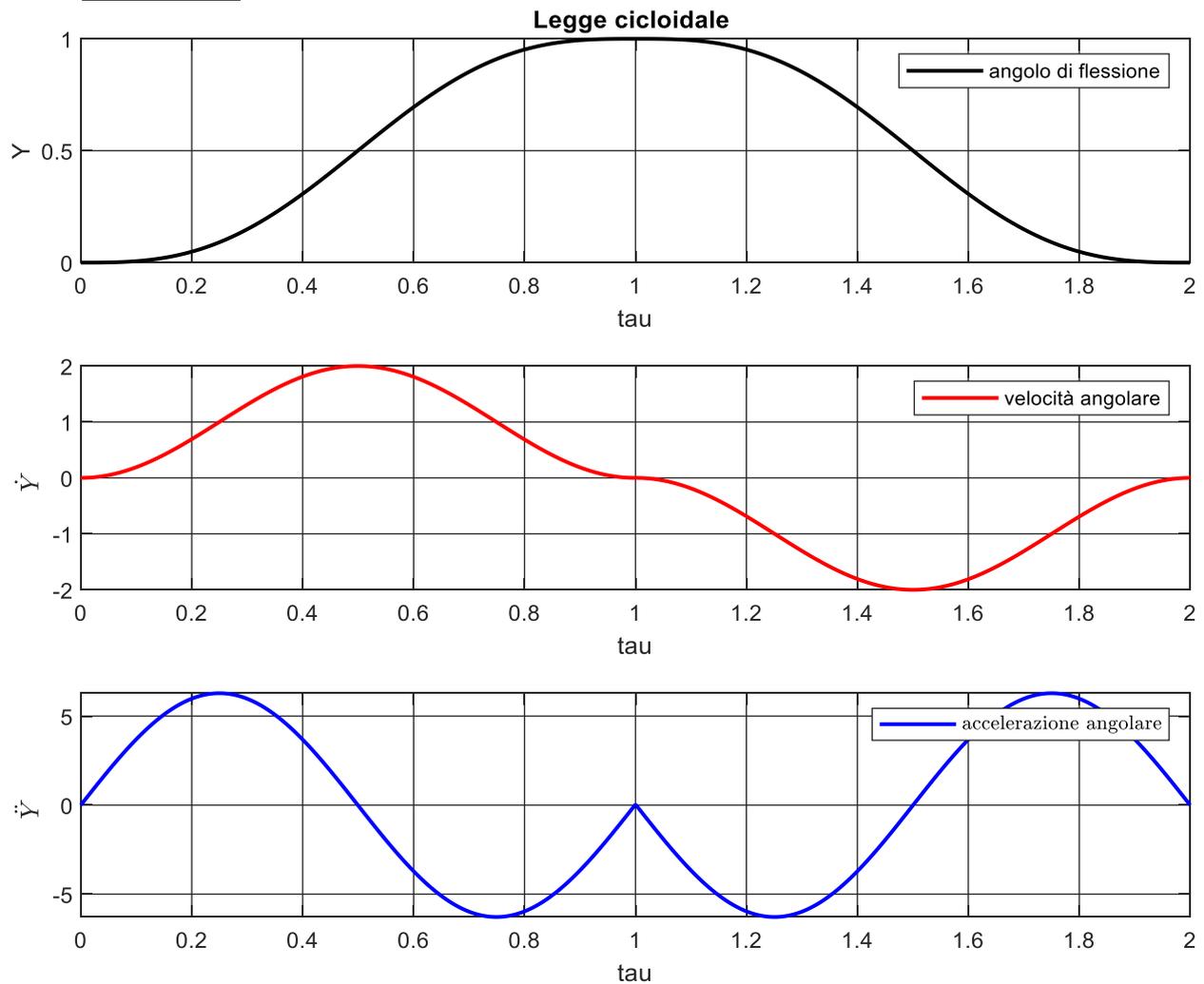


Figura 22-Legge Cicloidale

Si riportano nel seguente grafico gli andamenti relativi allo spostamento, alla velocità e all'accelerazione angolare in funzione del tempo caratteristici della legge cicloidale.

Come sperimentalmente verificato e precedentemente spiegato, l'andamento delle grandezze cinematiche riportate nel grafico è realistico.

L'operatore parte da fermo in posizione eretta e impiega un secondo per effettuare il piegamento in avanti seguendo un trend che ricorda una senoide.

Nei primi decimi di secondo si ha un incremento sia in termini di velocità che di accelerazione.

Prima che l'operatore termini il piegamento, velocità ed accelerazione decrescono fin quando l'uomo non raggiunge la posizione stabile e si annullano.



Per la fase di risalita il ragionamento è analogo e gli andamenti risultano ribaltati.

È stato interessante valutare l'effetto dell'accelerazione sulle spalle dell'operatore in tutta la sua fase di movimento. Il grafico sottostante esprime l'andamento in rapporto all'accelerazione di gravità.

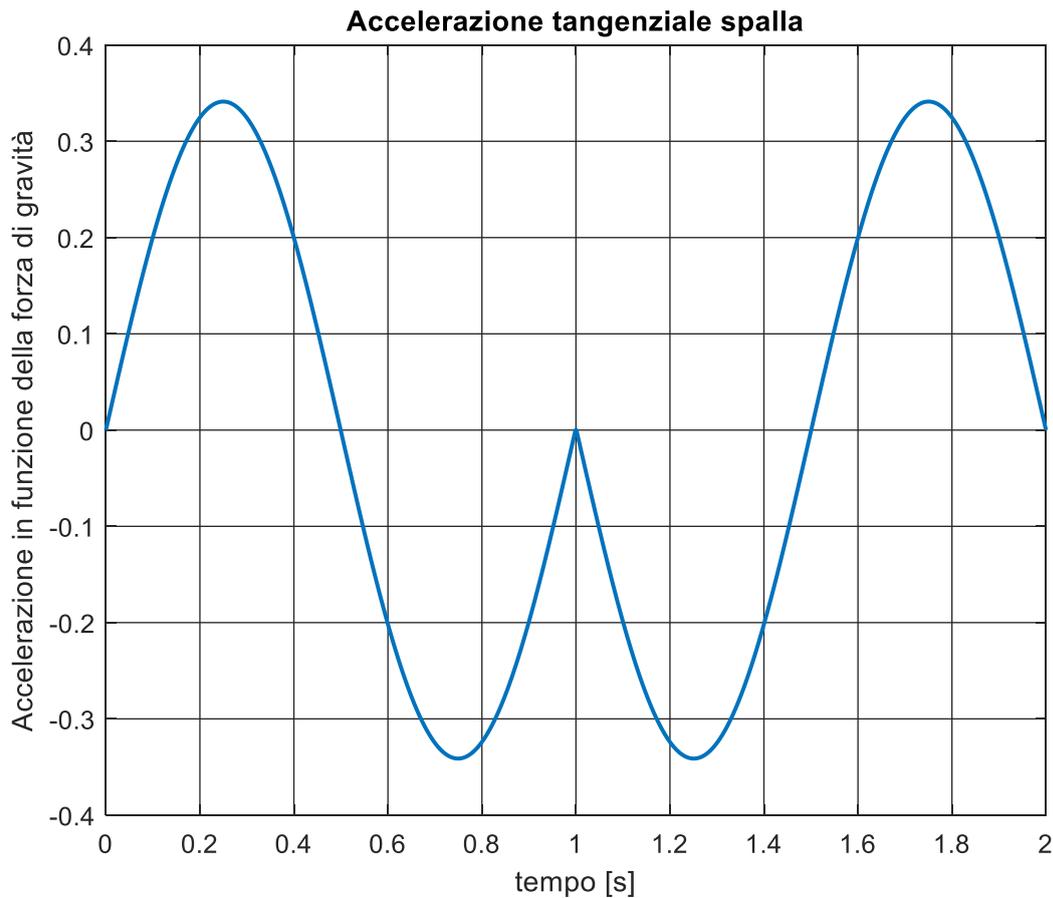


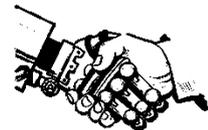
Figura 23-Andamento accelerazione tangenziale

Il valore massimo in termini di  $g$  percepito dall'uomo è pari a:

$$a_{t\_max} = \frac{\ddot{v} \cdot d_{spalla}}{g} = 0.34g$$

con  $d_{spalla} = (0.818 - 0.530) \cdot h_{uomo}$

Il risultato ottenuto rientra nei limiti umani di sopportazione che oscillano tra i  $3g$  e i  $4g$ .



## Dinamica.

Per poter ricavare le relazioni matematiche inerenti alla dinamica del dispositivo è stato necessario tracciare il diagramma di corpo libero del sistema uomo+struttura. In questo modo è stato possibile ricavare l'equazione che meglio descrive il movimento oggetto di studio. Considerando positivo il verso orario di accelerazione velocità e spostamento angolare, si avrà:

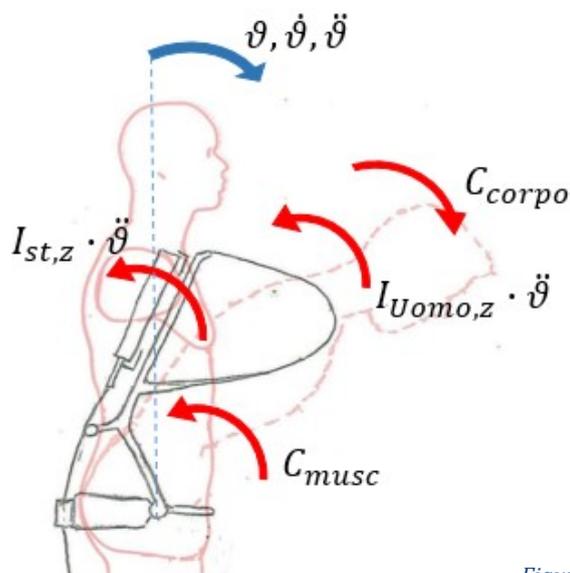


Figura 24-Dcl uomo+struttura

$$C_{corpo} - (I_{Uomo,z} + I_{st,z}) \cdot \ddot{\vartheta} = C_{Musc} + C_{exo}$$

$\ddot{\vartheta}, \dot{\vartheta}, \vartheta$  = Accelerazione, Velocità e Spostamento angolare

$C_{corpo}$  = Coppia esercitata dal corpo umano

$I_{Uomo,z}$  = Momento di inerzia dell' uomo riferito all' asse z

$I_{st,z}$  = Momento d' inerzia della struttura riferito all' asse z

$C_{Musc}$  = Coppia esercitata dai muscoli

$C_{exo}$  = Coppia di supporto esercitata dall' esoscheletro

L' equazione nel riquadro rappresenta quindi l' equazione dinamica del dispositivo. Vengono ora descritti i contributi sopracitati e il metodo con cui sono stati ricavati.



### Coppia del corpo

La valutazione della coppia che il corpo umano eroga in fase di flessione ed estensione del tronco è linearmente dipendente all'angolo di flessione e corrisponde all'insieme dei momenti esercitati dal peso dei singoli segmenti corporei coinvolti nel movimento di flesso/estensione.

I dati antropometrici si sono resi utili per determinare le corrette distanze di ogni segmento corporeo dal relativo baricentro. Per garantire una certa sicurezza di utilizzo, e com'è di buona norma in fase di progettazione, si è deciso di operare nella condizione più gravosa ipotizzando un movimento di flessione in avanti con le braccia distese e inclinate di  $45^\circ$ .

Pertanto l'equazione che permette di ricavare la coppia del corpo risulta:

$$C_{\text{corpo}} = m_{T_R} \cdot g \cdot \sin(\vartheta) \cdot d_{T_R} + m_{T+C} \cdot g \cdot \sin(\vartheta) \cdot d_{T_C} + 2 \cdot m_{A_S} \cdot g \cdot (2 \cdot d_{T_R} \cdot \sin(\vartheta) + d_{A_S} \cdot \cos \frac{\pi}{4})$$

con:

$$m_{T_R} = 0,497 \cdot m_{\text{uomo}}$$

$$m_{T+C} = 0,081 \cdot m_{\text{uomo}}$$

$$m_{A_S} = 2 \cdot (0,05) \cdot m_{\text{uomo}}$$

$$d_T = 0,5 \cdot (0,818 - 0,530) \cdot h_{\text{uomo}}$$

$$d_{T+C} = (1 - 0,530) \cdot h_{\text{uomo}}$$

$$d_{A_S} = 0,530 \cdot (0,818 - 0,377) \cdot h_{\text{uomo}}$$

} da dati antropometrici

Definiti come:

$m_{T_R}$  = massa del tronco

$m_{T+C}$  = massa Testa+collo

$m_{A_S}$  = massa arto superiore

$d_T$  = distanza tronco dal relativo baricentro

$d_{T+C}$  = distanza segmento testa-collo dal relativo baricentro

$d_{A_S}$  = distanza arti superiori dal relativo baricentro

Ricavato il valore di coppia esercitato dal corpo in fase di flessione, è stato possibile tracciare l'andamento in funzione del tempo (illustrato in figura).



Si nota che la curva non parte da un valore nullo, bensì da un valore pari a  $28,49 \text{ N} \cdot \text{m}$  che corrisponde al contributo dato dalle braccia in avanti e inclinate di  $45^\circ$ . Il massimo valore raggiunto è pari a  $229,34 \text{ N} \cdot \text{m}$

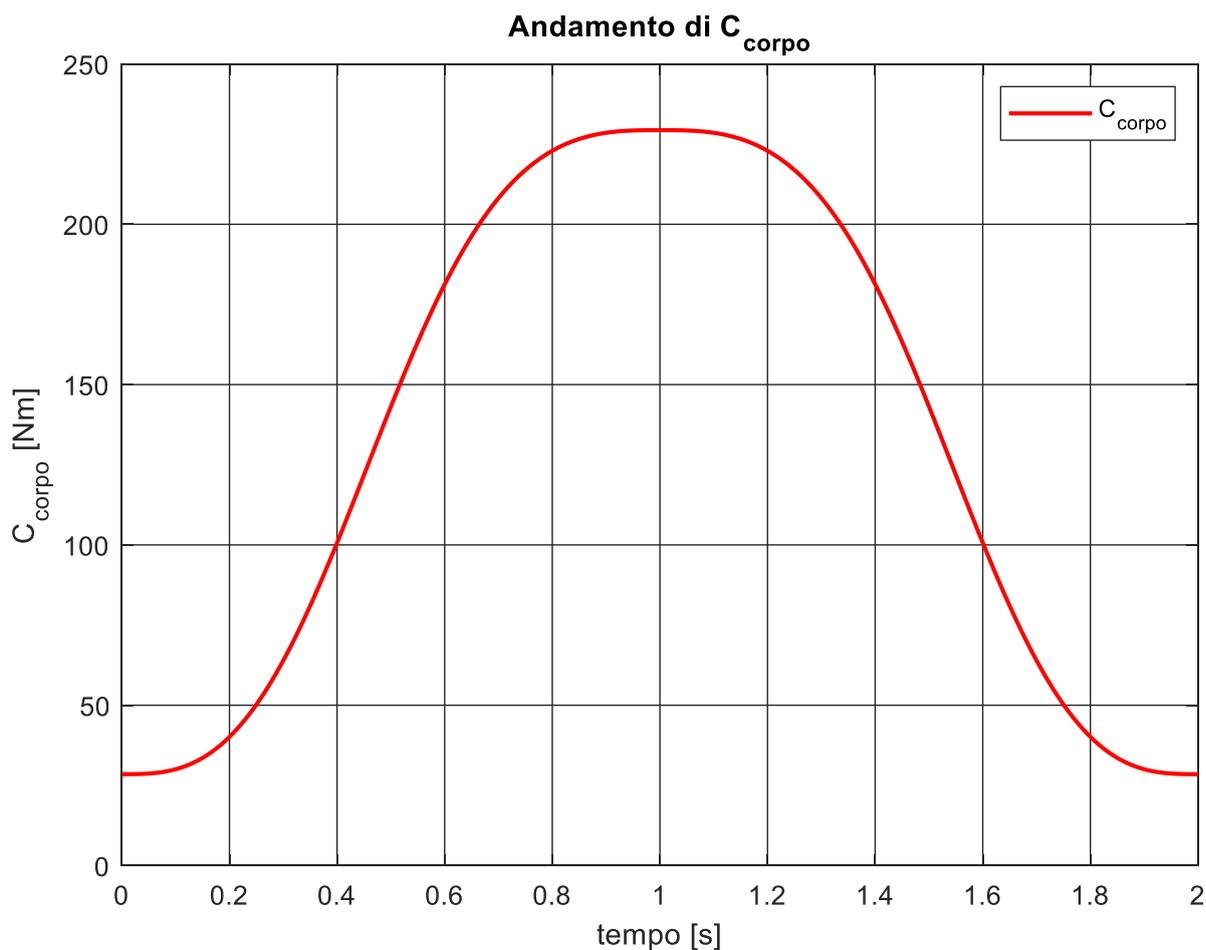
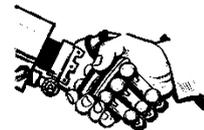


Figura 25-Andamento Coppia del corpo



### Coppia dei muscoli

Ipotizzando che l' esoscheletro non dia contributo e che quindi  $C_{exo} = 0$ , si definisce la coppia dei muscoli in questo modo :

$$C_{Musc} = C_{corpo} - (I_{Uomo,z} + I_{st,z}) \cdot \ddot{\vartheta}$$

In particolare, i muscoli sollecitati nelle due fasi di discesa e risalita sono i muscoli estensori e flessori del tronco. Per comprendere il momento in cui agiscono precisamente tali muscoli, è necessario introdurre in primo luogo il metodo di calcolo adottato per ricavare l' inerzia totale dell' uomo e quindi la coppia inerziale.

### Coppia Inerziale

La valutazione dell' inerzia dell' uomo è stata semplificata associando ad ogni segmento del corpo una figura geometrica nota e sfruttando il Teorema di Huygens Steiner applicato attorno l' asse z.

Di seguito viene mostrato il modello dell' uomo con le figure geometriche associate.

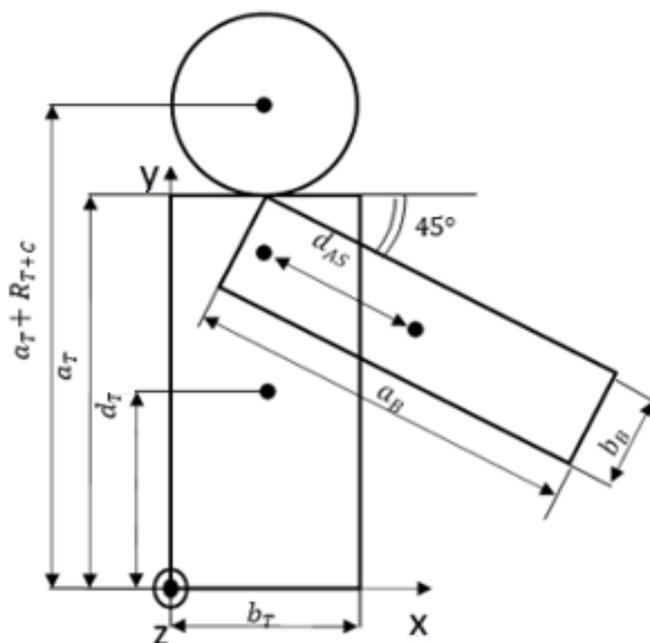


Figura 26-Modello uomo per determinazione inerzie

Si è ipotizzato:

- Un cerchio di raggio  $R_{T+c}$  per schematizzare la testa;
- Un rettangolo di lati  $a_T$  e  $b_T$  per schematizzare il tronco;
- Un rettangolo di lati  $a_B$  e  $b_B$  per schematizzare le braccia.



I dati antropometrici precedentemente dichiarati, sono stati utili per definire in termini quantitativi i raggi e i lati in funzione dell' altezza dell' uomo:

$$a_T = 2 \cdot d_T \quad \text{Lunghezza tronco secondo l' asse y}$$

$$b_T = \frac{0,191 \cdot h_{uomo}}{2} \quad \text{Lunghezza tronco secondo l' asse x}$$

$$a_B = (0,818 - 0,377) \cdot h_{uomo} \quad \text{Distanza tra centro spalla ed estremità della mano}$$

$$b_B = 0,05 \cdot h_{uomo} \quad \text{Larghezza ideale dell' arto superiore}$$

$$R_{T+C} = (1 - 0,818) \cdot h_{uomo} \quad \text{Distanza dal baricentro della testa alla base del collo}$$

$d_T$  e  $d_{A_s}$  definiti nelle pagine precedenti.

Attraverso l' applicazione del Teorema è stato poi possibile ricavare i seguenti contributi d' inerzia:

$$I_{T+C} = \frac{2}{5} \cdot m_{TC} \cdot (R_{T+C})^2 + m_{TC} \cdot (R_{T+C} + 2 \cdot d_T)^2 \quad \text{Inerzia data dal segmento testa+collo}$$

$$I_{A_s} = 2 \cdot \frac{1}{12} \cdot m_{A_s} \cdot (a_B^2 + b_B^2) + 2 \cdot m_{A_s} \cdot (2 \cdot d_T - d_{A_s} \cdot \sin \frac{\pi}{4})^2 \quad \text{Inerzia relativa agli arti superiori}$$

$$I_{Tronco} = \frac{1}{12} \cdot m_{Tronco} \cdot (a_T^2 + b_T^2) + m_{Tronco} \cdot d_T^2 \quad \text{Inerzia del tronco}$$

Sommando i contributi si ottiene:

$$I_{Uomo,z} = I_{T+C} + I_{A_s} + I_{Tronco}$$

Moltiplicando tale contributo per l' accelerazione angolare ricavata in cinematica, si ottiene la coppia inerziale.

$$C_{inerziale} = I_{Uomo,z} \cdot \ddot{\vartheta}$$

Si possono a questo punto analizzare gli andamenti delle coppie in modo da definire le zone specifiche in cui agiscono i muscoli prima nominati.

Il fatto che si sia ipotizzato di tenere le braccia inclinate durante la flessione/estensione del tronco fa sì che i muscoli inizialmente sollecitati, siano i muscoli estensori.

Dal grafico si nota che, all' aumentare della coppia inerziale, aumenta il contributo dei muscoli flessori e diminuisce il contributo degli estensori. Questo si verifica principalmente nell' incipit del movimento e lo si nota in quanto l' andamento in blu, presenta un minimo nella fase in cui la coppia inerziale cresce.



Al crescere dell' angolo di flessione, il contributo d' inerzia diminuisce e la maggior parte del movimento interesserà i muscoli estensori che daranno un importante contributo in termini di coppia muscolare.

Quando, passato 1s, l' uomo riparte dalla posizione di flessione massima e intende ritornare nella posizione di partenza, deve vincere sia la coppia del corpo che l' inerzia. Per poterlo fare stressa i muscoli estensori. Gli andamenti sono simmetrici e la distribuzione dello stress muscolare segue lo stesso ragionamento fatto per la fase di discesa.

In figura viene illustrato quanto sopra spiegato in funzione del tempo.

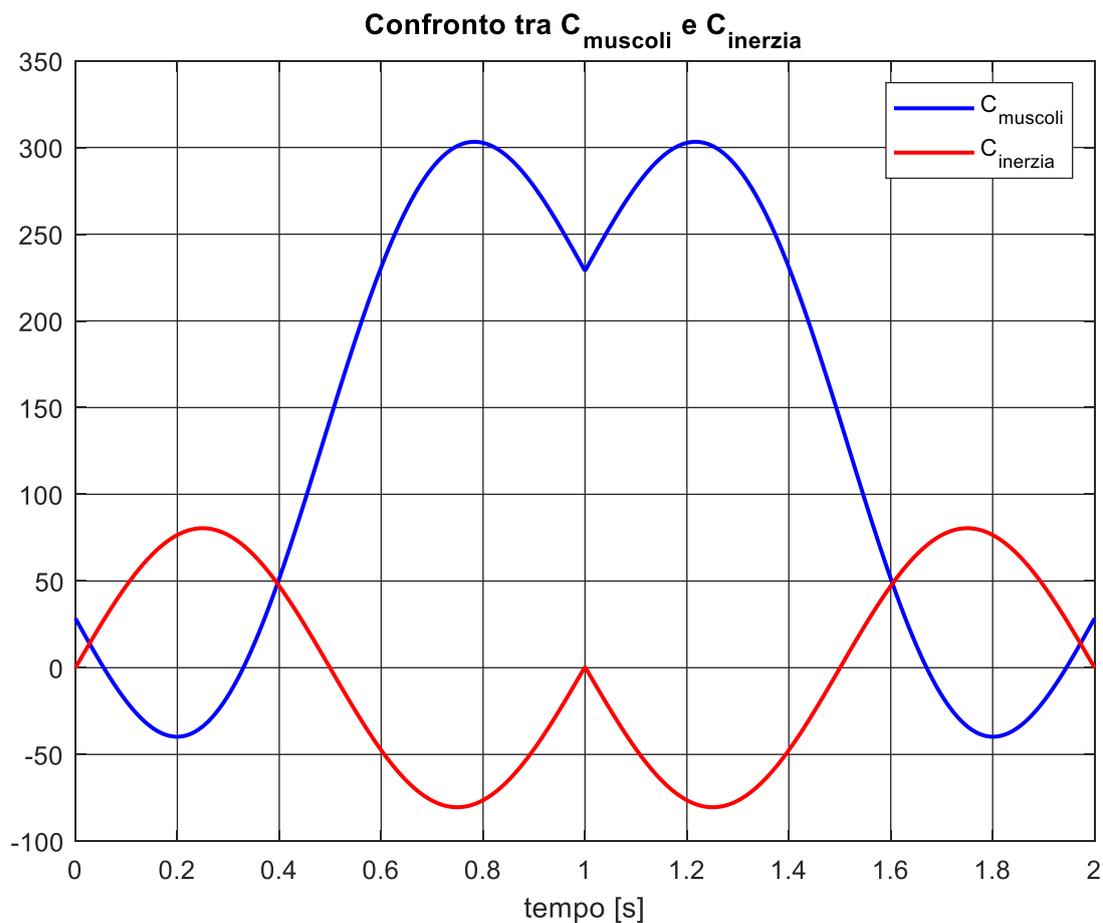
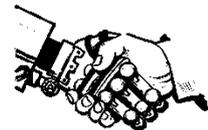


Figura 27- $C_{\text{muscoli}}$  Vs  $C_{\text{Inerzia}}$

L' inerzia della struttura non influisce in maniera preponderante nell' equazione delle coppie. Il suo valore è stato stabilito direttamente dal software SOLIDWORKS inserendo le specifiche del materiale scelto.



Si andrà ora a considerare il caso in cui  $C_{exo} \neq 0$  e quindi come cambia il contributo muscolare.

L' utilizzo dell' esoscheletro, inteso come mezzo per cui lo sforzo muscolare si riduce, consente all' operatore di lavorare in condizioni ergonomiche migliorate.

In figura vengono mostrati gli andamenti di coppia dei muscoli con e senza esoscheletro. In fase di progettazione si è ipotizzato che l' utilizzo del dispositivo fornisca il 30 % della coppia che i muscoli fornirebbero senza di esso.

Si nota infatti una diminuzione di coppia fornita dai muscoli pari a circa  $100 \text{ N} \cdot \text{m}$ . Una riduzione notevole che permette senz' altro di moderare i dolori muscoloscheletrici.

Per garantire una certa libertà di movimento inoltre, si è deciso di far funzionare l' esoscheletro dopo i primi  $15^\circ$  di flessione.

In figura, gli andamenti a confronto.

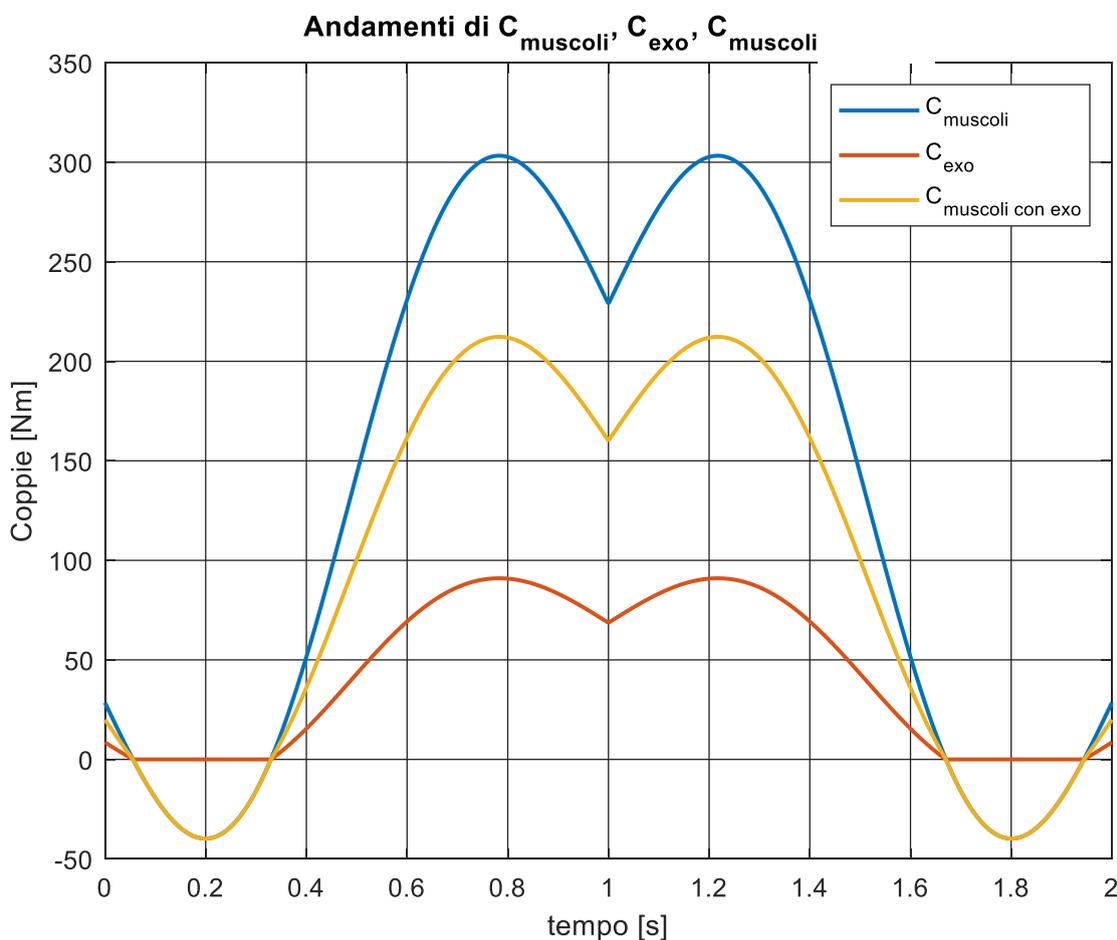
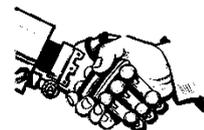


Figura 28-Andamento Coppia Corpo, Coppia Muscoli, Coppia Exo a confronto

Analizziamo nel dettaglio l' andamento di coppia fornito dall' esoscheletro.



L' andamento mostrato in figura si presenta, per certi tratti, simile al trend di coppia muscolare. Si nota un tratto iniziale che parte da un valore di  $8,54 \text{ N} \cdot \text{m}$  e poi si annulla restando tale per alcuni decimi di secondo. L' esistenza di tale tratto di coppia è dovuta all' ipotesi di considerare le braccia tese a  $45^\circ$  che sollecitano gli estensori e inducono l' attivazione dell' esoscheletro. Il tratto in cui non si verificano variazioni di coppia è il tratto in cui si garantiscono i  $15^\circ$  di libertà prima citati. Successivamente l' andamento è simile ai trend muscolari, presentando un valore massimo pari a  $90,98 \text{ N} \cdot \text{m}$ .

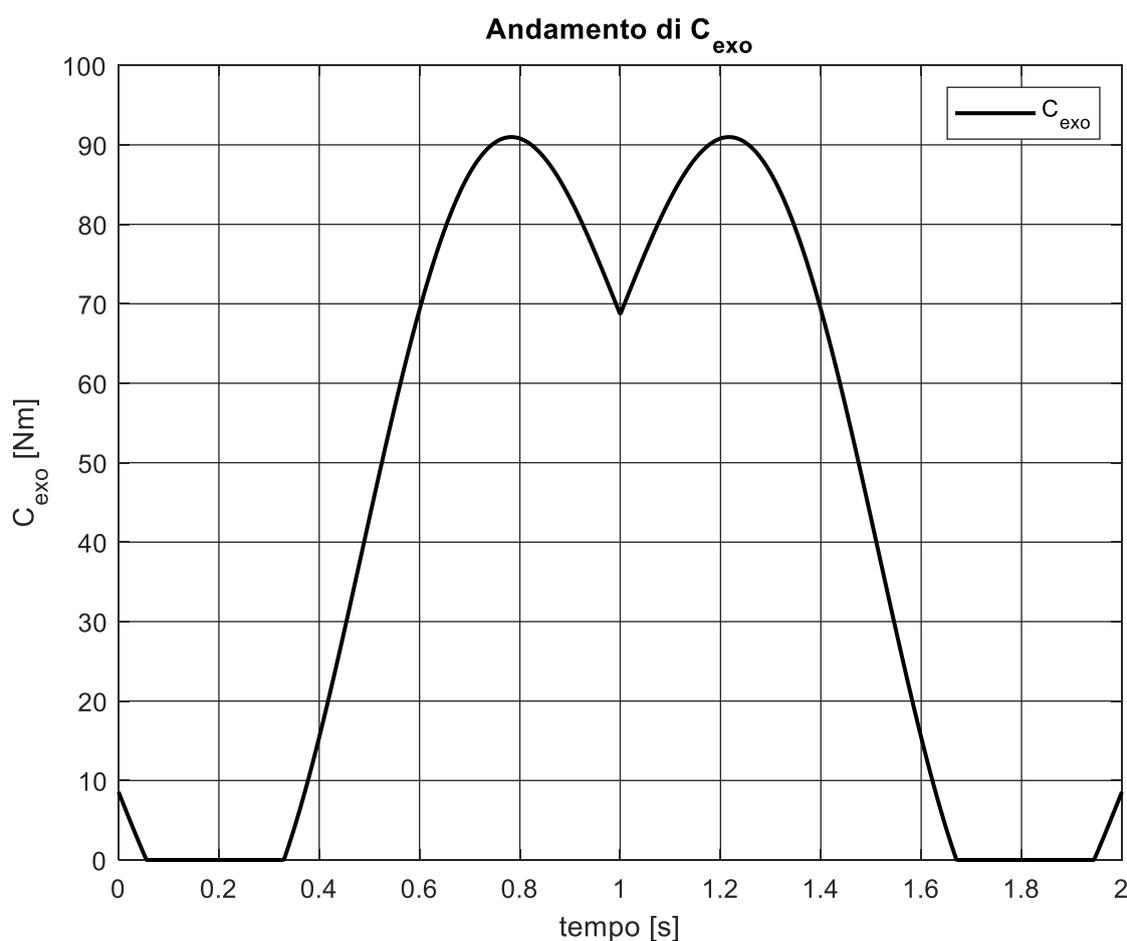


Figura 29-Coppia Esoscheletro

La veridicità delle equazioni dinamiche impostate è dimostrata dalla simulazione ottenuta con il software Simulink–Simscape Multybody, analisi sperimentale illustrata nel seguente paragrafo.



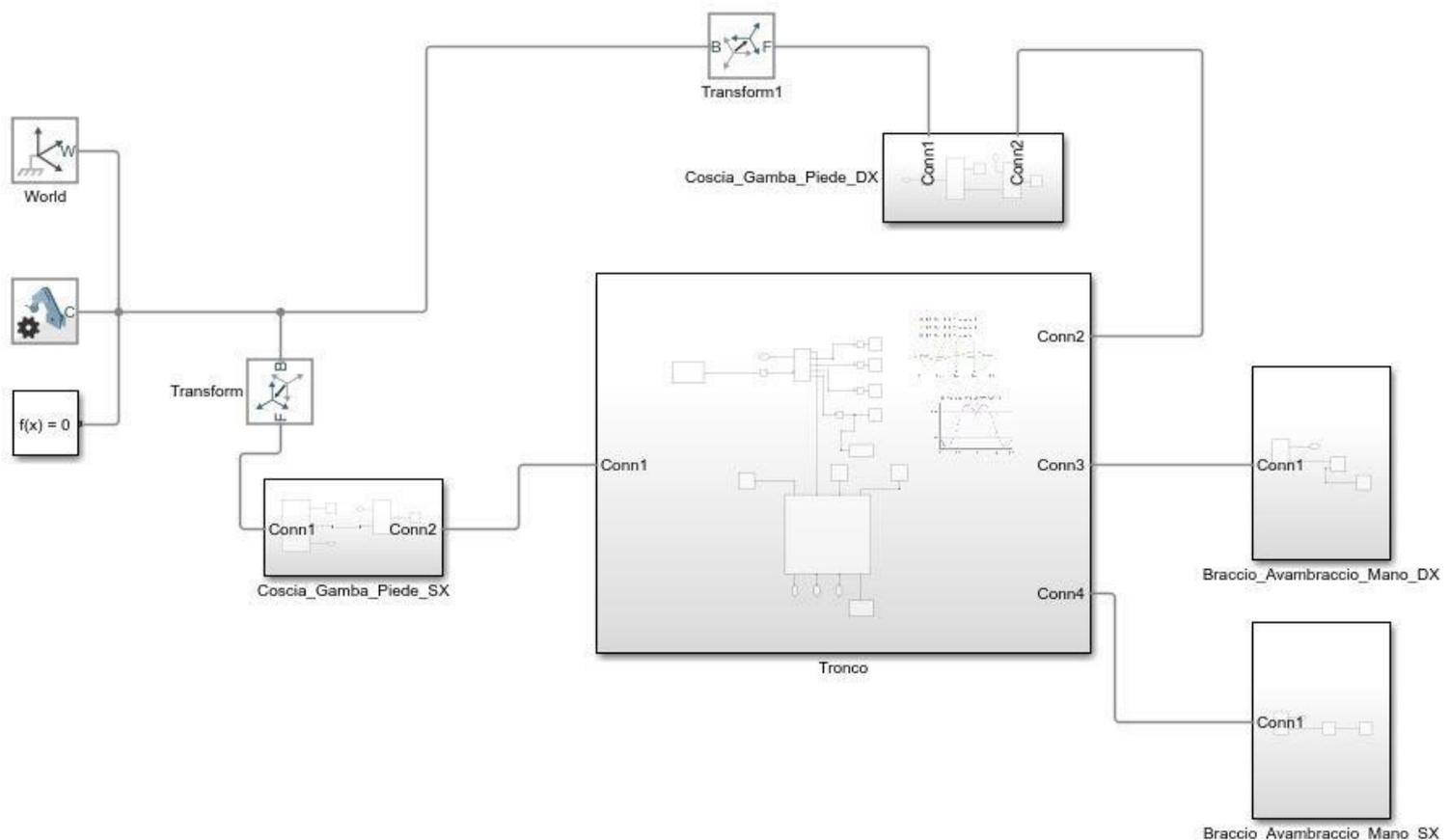
### *Prova sperimentale attraverso Simscape Multibody*

*Prima di inoltrarsi nella definizione della geometria finale del dispositivo, è stato ritenuto necessario assicurarsi che tutte le ipotesi effettuate e i risultati ottenuti fossero corretti. L' esistenza di uno specifico tool di connessione tra il programma SolidWorks® e Simulink–Simscape Multibody® ha reso possibile verificare quanto analizzato.*

*Dunque una volta scelto il modello dell' uomo che più si avvicinasse alle specifiche prima citate (preso dal web) e accoppiato con il primo modello di struttura realizzato, si è sfruttato il tool per esportare il modello CAD sul software Simulink–Simscape Multibody®.*

*Tale software ha tradotto il modello CAD in uno schema a blocchi mantenendo le connessioni e gli accoppiamenti assegnati in fase di realizzazione del CAD.*

*In figura viene mostrato quanto ricavato a seguito dell' esportazione.*



*Figura 30-Schema a blocchi Simscape Multibody*



Il blocco centrale è costituito dal tronco al quale sono collegati tutti gli altri blocchi. Effettuando uno zoom sul giunto d' anca si comprende meglio la sperimentazione.

Il blocchetto riceve in ingresso l' andamento della posizione angolare ipotizzato in fase di analisi cinematica e restituisce in uscita informazioni sulla coppia muscolare. Tale valore di coppia è direttamente generato dal software Simulink–Simscape Multibody® e corrisponde al termine di paragone con cui è stata confrontata la coppia muscolare ottenuta a seguito delle equazioni impostate.

In figura viene mostrato lo zoom in questione.

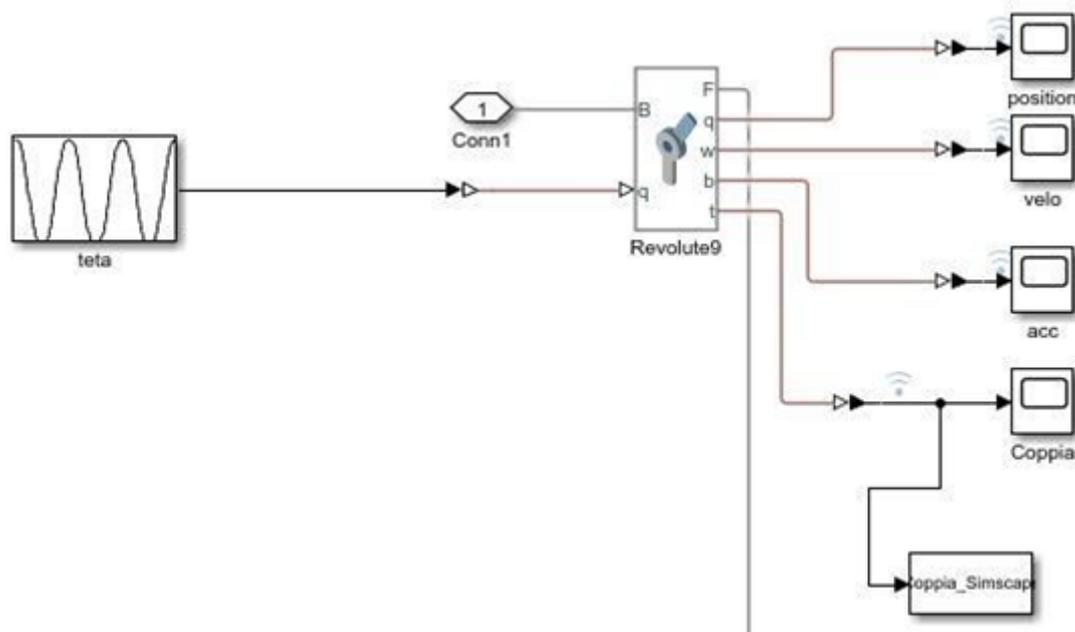
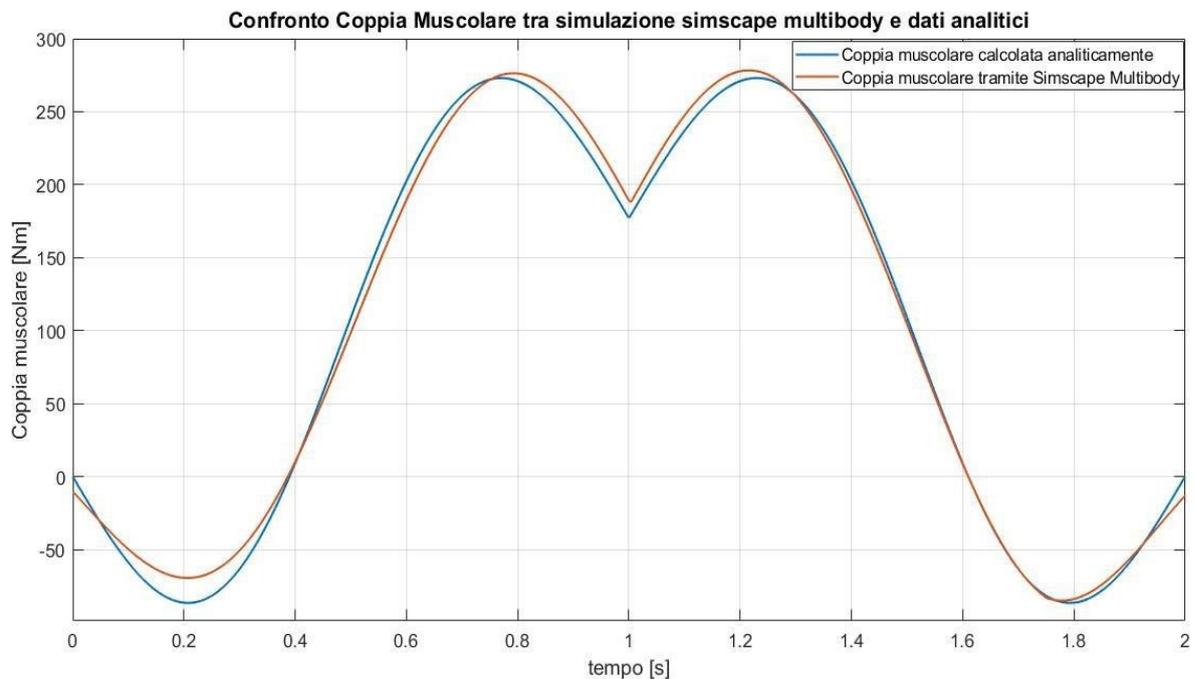


Figura 31-Zoom schema a blocchi precedente

La diretta connessione tra il software MATLAB e Simulink–Simscape Multibody® ha reso possibile associare nello stesso grafico i trend di coppia muscolare teorico e sperimentale. Qui di seguito mostrato in figura.



*Figura 32-Risultati ottenuti dopo simulazione e confronto con i dati analitici*

Come si può notare l'andamento generato dal software segue molto bene quello ottenuto analiticamente a patto di alcuni scostamenti dovuti alle inerzie dell'uomo.

A fronte di tutte le considerazioni fatte, tale prova si è reputata una dimostrazione soddisfacente.

Successivamente, si è passati alla definizione della geometria e alla scelta dei componenti compatibili con quanto ricavato.

Nel capitolo successivo si illustreranno quindi gli aspetti fondamentali che hanno contraddistinto la disposizione dei componenti costituenti l'esoscheletro.



## CAPITOLO II

### Iter progettuale del dispositivo

Nel seguente capitolo si rivolgerà l'attenzione su ciò che riguarda la geometria del dispositivo, focalizzandosi sulle due posizioni assunte nel piano sagittale e descrivendo nel dettaglio cosa succede all'interno degli attuatori quando è attivo l'esoscheletro.

Si andranno inoltre a definire, attraverso calcoli trigonometrici, angoli e lunghezze utili per i successivi calcoli strutturali con cui è stato ideato l'esoscheletro.

#### Definizione della struttura

Si è partiti considerando e analizzando una bozza di struttura nelle due posizioni assunte nel piano sagittale. Tali posizioni corrispondono a:

- Posizione eretta con  $\vartheta = 0$
- Flessione con  $\vartheta_{max}$

La struttura si compone dei seguenti elementi:

- Link Fisso
- Link Mobile
- Leg Link
- Pulegge di rinvio su entrambi i link
- Fune metallica
- Para-coscia
- Perno
- Teste a snodo con cuscinetto a doppia corona di sfere integrate

Non essendo a conoscenza delle dimensioni effettive della struttura, in termini di sezione e di spessore, tutti i componenti sono stati schematizzati con segmenti collegati puntualmente tra di loro.

I 3 link infatti, come si nota dalla figura, convergono nello stesso punto corrispondente al giunto d'anca. Puntuali sono anche raffigurati gli estremi di attacco della fune, allo stelo dell'attuatore e al para-coscia.

Facendo riferimento ai dati antropometrici, nell'ottica di rendere il dispositivo il più compatto possibile, sono state scelte le seguenti grandezze iniziali.

- $l_1 = 220 \text{ mm}$
- $l_2 = 0,288 \cdot h_{uomo} - 0,031 \cdot h_{uomo}$
- $\vartheta_0 = 20^\circ$
- $l_{r2} = l_1 \cdot \cos \vartheta_0 = 206,73 \text{ mm}$
- $L = 0,191 \cdot h_{uomo}$
- $\beta = 60^\circ$

Si nota quanto tali parametri siano legati tra loro o espressi in funzione dell'altezza dell'uomo. Le scelte progettuali a fini ergonomici sono quelle fatte per  $l_1$ ,  $\vartheta_0$ ,  $\beta$ .

Si è cercato di trovare il giusto compromesso tra comodità nell'indossare il dispositivo e capacità di erogare quanto necessario.



Una scelta funzionale è quella relativa a  $l_{r2}$ , che corrisponde alla lunghezza nel piano sagittale del link fisso. Il fatto di assumerla pari alla proiezione lungo l'asse x della lunghezza  $l_1$ , garantisce la costante aderenza della fune alle pulegge in ogni posizione assunta dall'operatore.

In figura viene mostrata la bozza oggetto di analisi.

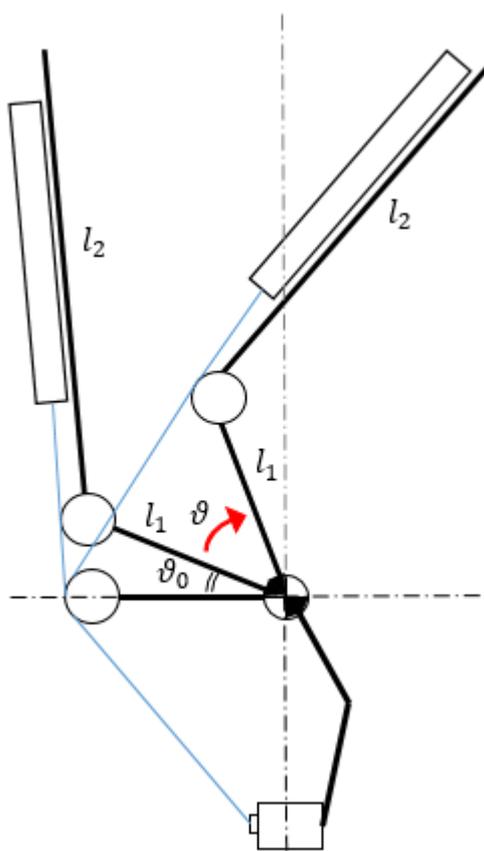
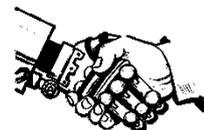


Figura 33-Bozza struttura

Dopo aver definito tali grandezze, lo studio si è incentrato sul meccanismo di rinvio.

Con l'ausilio della trigonometria, sono state ricavati angoli e lunghezze utili anche per la determinazione della corsa effettiva dell'attuatore.

Nel prossimo paragrafo sarà approfondito lo studio di tale meccanismo.



## Meccanismo di rinvio

Lo studio del meccanismo di rinvio è stato affrontato considerando le pulegge puntuali e sfruttando le relazioni trigonometriche note.

In questa fase, si è considerato il caso in cui le due pulegge non fossero allineate. La fune in posizione iniziale genera un angolo con la verticale denominato  $\rho_0$  e assume un valore differente man mano che l'operatore raggiunge la posizione finale.

Dal Teorema dei seni è stato possibile ricavare il valore di tale angolo nelle due condizioni.

- Posizione iniziale

$$\frac{\overline{AB}}{\sin \vartheta_0} = \frac{\overline{BC}}{\sin(\frac{\pi}{2} - \rho_0)}$$

$$\overline{AB} = \sqrt{(l_1 \cdot \sin \vartheta_0)^2 + (l_{r2} - l_1 \cdot \cos \vartheta_0)^2}$$

$$\overline{BC} = l_1$$

$$\cos \rho_0 = \sin \vartheta_0 \cdot \frac{\overline{BC}}{\overline{AB}}$$

$$\rho_0 = \cos^{-1} \left( \sin \vartheta_0 \cdot \frac{l_1}{\sqrt{(l_1 \cdot \sin \vartheta_0)^2 + (l_{r2} - l_1 \cdot \cos \vartheta_0)^2}} \right)$$

nel caso in cui le pulegge fossero allineate  $\rho_0 = 0$

- Posizione finale

$$\frac{\overline{AD}}{\sin(\vartheta_0 + \vartheta)} = \frac{\overline{CD}}{\sin(\frac{\pi}{2} - \rho_0 - \rho)}$$

$$\overline{AD} = \sqrt{(l_1 \cdot \sin(\pi - \vartheta_0 - \vartheta))^2 + (l_{r2} - l_1 \cdot \cos(\pi - \vartheta_0 - \vartheta))^2}$$

$$\overline{CD} = l_1$$

Si avrà :

$$\cos(\rho_0 + \rho) = \sin(\vartheta_0 + \vartheta) \cdot \frac{\overline{CD}}{\overline{AD}}$$

$$\rho + \rho_0 = \cos^{-1} \left( \sin(\vartheta_0 + \vartheta) \cdot \frac{l_1}{\sqrt{(l_1 \cdot \sin(\vartheta_0 + \vartheta))^2 + (l_{r2} - l_1 \cdot \cos(\vartheta_0 + \vartheta))^2}} \right),$$

Dunque sostituendo con l'espressione di  $\rho_0$  si avrà:

$$\rho = \cos^{-1} \left[ \sin(\vartheta_0 + \vartheta) \cdot \frac{l_1}{\sqrt{(l_1 \cdot \sin(\vartheta_0 + \vartheta))^2 + (l_{r2} - l_1 \cdot \cos(\vartheta_0 + \vartheta))^2}} \right] - \cos^{-1} \left[ \sin \vartheta_0 \cdot \frac{l_1}{\sqrt{(l_1 \cdot \sin \vartheta_0)^2 + (l_{r2} - l_1 \cdot \cos \vartheta_0)^2}} \right]$$

La determinazione di tale angolo si è rivelata utile sia per calcolare il valore della corsa dell'attuatore sia per ottenere il valore delle componenti della tensione del filo lungo i due assi considerati. In figura viene illustrato lo schema utilizzato per ricavare le relazioni suddette.

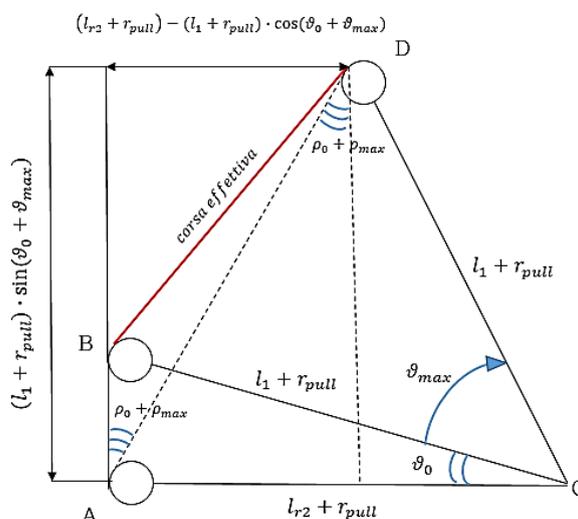


Figura 34-Posizioni successive Puleggia

### Corsa dell' attuatore e tensione del filo

La scelta delle lunghezze della struttura precedentemente effettuata, ha generato indirettamente la corsa effettiva dell' attuatore. Per la determinazione, come si è già detto, è stata sfruttata la trigonometria.

Lo stelo dell' attuatore parte dalla posizione iniziale indicata con B e raggiunge il punto D nella posizione di flessione massima. La corsa dunque esercitata dall' attuatore corrisponde al segmento  $\overline{BD}$ . Vengono mostrati qui di seguito i calcoli per ottenere il segmento della corsa.

$$\frac{\overline{AB}}{\sin(\vartheta_0)} = \frac{\overline{AD}}{\sin(\vartheta_0 + \vartheta_{max})}$$

$$\overline{AD} = \sqrt{(l_1 + r_{pul_1}) \cdot \sin(\vartheta_0 + \vartheta_{max})^2 + ((l_{r2} + r_{pul_2}) - (l_1 + r_{pul_1}) \cdot \cos(\vartheta_0 + \vartheta_{max}))^2}$$

$$\overline{BD} = \sqrt{((l_1 + r_{pul_1}) \cdot \sin(\vartheta_0 + \vartheta_{max}) - (l_1 + r_{pul_1}) \cdot \sin(\vartheta_0))^2 + ((l_{r2} + r_{pul_2}) - (l_1 + r_{pul_1}) \cdot \cos(\vartheta_0 + \vartheta_{max}))^2}$$

La tensione del filo dipende dalla coppia fornita dall' esoscheletro e dal suo braccio.

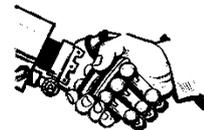
Dato che tale tensione si scompone lungo gli assi, è opportuno determinare il braccio per ogni singola componente. Si hanno pertanto:

$$y = (l_1 + r_{pul_1}) \cdot \sin(\vartheta_0 + \vartheta_{max})$$

$$x = (l_1 + r_{pul_1}) \cdot \cos(\vartheta_0 + \vartheta_{max})$$

Dove  $y$  corrisponde al braccio della componente orizzontale della tensione del filo, mentre  $x$  è il braccio relativo alla componente verticale.

Conoscendo il valore della coppia dell' esoscheletro possiamo dunque esprimere il valore della tensione pari a:



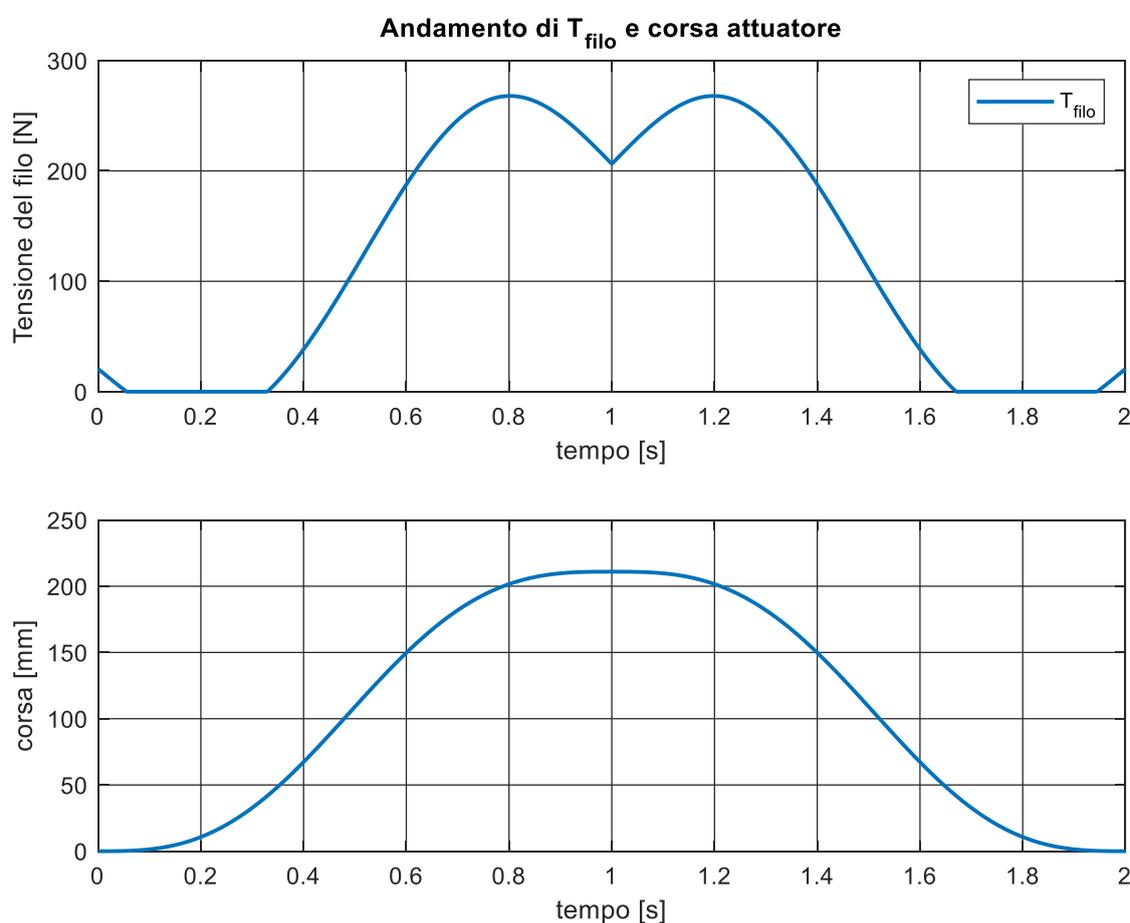
$$T_{Filo} = \frac{1}{2} \cdot \frac{C_{exo}}{\sin(\rho + \rho_0) \cdot y + \cos(\rho + \rho_0) \cdot x}$$

$L' \frac{1}{2}$  sta ad indicare che la tensione del filo è equamente suddivisa tra i due attuatori.

Vengono riportati gli andamenti della tensione del filo e della corsa dell' attuatore entrambi in funzione del tempo. Si ottengono rispettivamente, i seguenti valori massimi:

$$T_{Filo\_max} = 267.87 \text{ N}$$

$$corsa\_max = 211 \text{ mm}$$



Il valore di corsa ottenuto è stato il punto di partenza per la scelta dell' attuatore. Per completezza si riporta nel seguente paragrafo una breve descrizione di ogni attuatore pneumatico considerato, citandone gli aspetti positivi e negativi.



## Tipologie di attuatori

Analizziamo gli aspetti positivi e negativi delle seguenti tipologie di attuatori:

1. Attuatore con stelo
2. Attuatore senza stelo
3. Muscolo pneumatico

1) I cilindri con stelo rappresentano gli organi più utilizzati in un sistema ad aria compressa. Sfruttano a pieno l'energia di un liquido o un gas in pressione garantendo operazioni controllate del sistema.

Tra i vantaggi fondamentali dei cilindri con lo stelo vi è la possibilità di ottenere moti alternativi, di regolare l'intensità della forza e di variare la velocità di spostamento. Il fatto che l'aria sia compressibile, fa sì che il moto dello stelo si adatti al carico esterno. Per ciò che concerne la spinta, dipende direttamente dalla pressione di alimentazione e possono essere comandati da valvole e quindi facilmente controllabili. Esistono cilindri con stelo a semplice effetto e a doppio effetto. I cilindri a doppio effetto sono i più usati in quanto possono lavorare in ambedue le corse di andata e ritorno e sono raccomandati, per grossi diametri e lunghe corse. Tra gli aspetti negativi, possono subire danni se le forze esterne sono perpendicolari all'asta, e sono sicuramente più pesanti dei muscoli pneumatici.



Figura 35-Attuatore con stelo a doppio effetto

2) I muscoli pneumatici sono caratterizzati dalla presenza di una membrana sottile in elastomero che racchiude l'unica camera in cui agisce il fluido in pressione; essa è leggera e in grado di raccogliere la forza che deriva dall'azione del fluido. Quando è alimentato aumenta di diametro e si contrae come un muscolo, esercitando forze di trazione, che diminuiscono al crescere della corsa. Tra i vantaggi fondamentali vi è il buon rapporto potenza/peso, facilità di montaggio, sono privi intrinsecamente del fenomeno dello stick and slip e possono essere utilizzati in ambienti di lavoro ostili. Tuttavia, sono difficili da controllare, sono soggetti ad un possibile scoppio all'aumentare della pressione d'esercizio quindi considerati rischiosi per l'operatore.



Figura 36-Muscolo pneumatico



3) I cilindri senza stelo sono maggiormente presi in considerazione quando bisogna porre una certa attenzione agli ingombri. I cilindri senza stelo sono ideali per le applicazioni in cui l'instabilità dei cilindri convenzionali può essere un problema. La superficie di spinta è maggiore rispetto a quella dei classici cilindri perché non è presente lo stelo.



Figura 37-Cilindro senza stelo

In seguito al confronto, la scelta più logica sarebbe stata quella di adoperare un cilindro senza stelo, ma essendo una soluzione già adottata in un altro elaborato si è optato per l'impiego di due cilindri con stelo a doppio effetto. Ogni cilindro esercita un valore di tensione dimezzato su una superficie d'azione minore rispetto a quella utilizzata per un cilindro senza stelo. Il problema più grande resta l'ingombro dello stelo quando l'operatore raggiunge la posizione finale. Vedremo successivamente le conseguenze di tale scelta. Si prosegue la trattazione andando ad analizzare il diagramma di corpo libero dell'attuatore.

**Diagramma di corpo libero dell'attuatore**

Oltre a conoscere il valore della corsa effettiva che il cilindro deve compiere, è necessario anche conoscere il valore di pressione all'interno delle camere. Con un semplice equilibrio di forze è stato ricavato che:

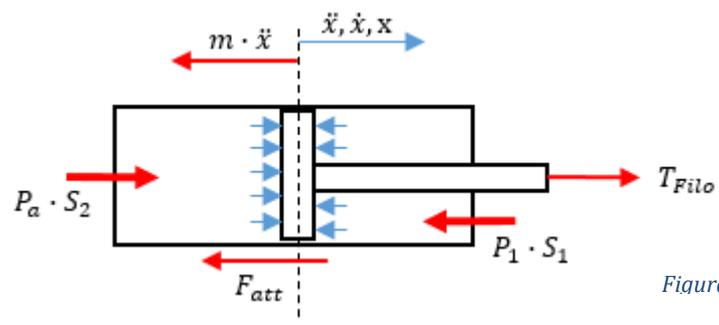


Figura 38-Dcl attuatore

$$T_{Filo} - p_1 \cdot S_1 + p_a \cdot S_2 - m\ddot{x} - F_{Att} = 0$$

con:

- $p_1$  = pressione camera anteriore
- $p_a$  = pressione ambiente
- $F_{Att}$  = Forza attrito
- $S_1 = \frac{\pi \cdot (d_{cil}^2 - d_{stelo}^2)}{4}$  Superficie lato stelo
- $S_2 = \frac{\pi \cdot d_{cil}^2}{4}$  Superficie opposta stelo
- $m$  = massa attuatore



Trascurando il termine inerziale e le forze di attrito tra il pistone e la camera, si ottiene:

$$T_{Filo} - p_1 \cdot S_1 + p_a \cdot S_2 = 0$$

Il valore della pressione all' interno della camera anteriore sarà dato da:

$$p_1 = \frac{T_{Filo} + p_a \cdot S_2}{S_1}$$

Il trend di pressione sotto illustrato rappresenta andamento simile osservato per la tensione del filo.

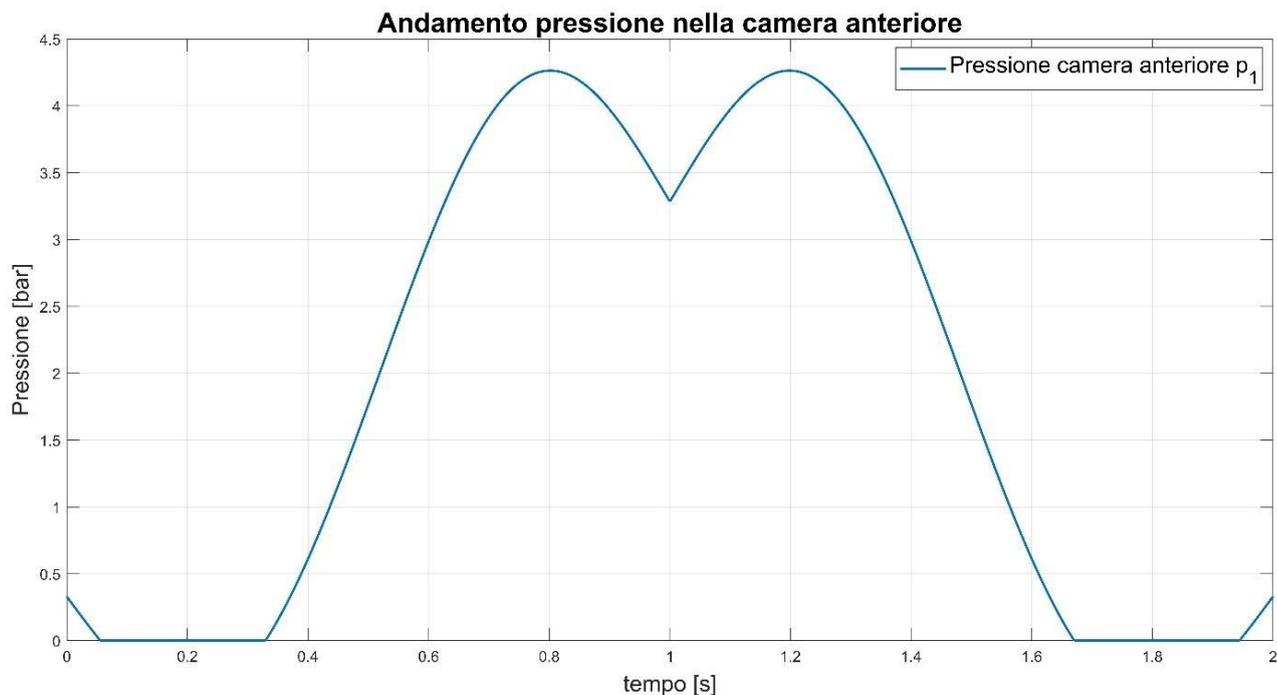


Figura 39-Andamento pressione camera

Il valore massimo che si verifica è pari a:

$$p_{max} = 4.3 \text{ bar}$$

Valore sopportabile dal cilindro scelto e valido per ogni attuatore del sistema.

E' stato scelto da catalogo METALWORKS il CILINDRO TONDO SERIE RNDC con  $d_{cil} = 32\text{mm}$  e  $d_{stelo} = 12\text{mm}$ .



## CAPITOLO III

### Link – mobile

Come è stato già citato nel secondo capitolo, l' esoscheletro è costituito da tre link differenti. Il back – frame corrisponde alla parte centrale di tutto il dispositivo: accompagna l' operatore in tutta la fase del movimento, funge da sede per le pulegge sulle quali viene trasmessa la tensione del filo e, attraverso una piastra opportunamente collegata ad esso, viene permesso il fissaggio degli attuatori.

È connesso alle spalle dell' uomo attraverso opportuni spallacci e ruota in corrispondenza dell' anca grazie ad un giunto adeguatamente ideato che ospita al suo interno un cuscinetto a sfere il quale è accoppiato con un perno. Quest' ultimo, è tenuto fisso in quanto si collega direttamente al bacino dell' operatore tramite cintura.

In figura viene mostrato quanto descritto.

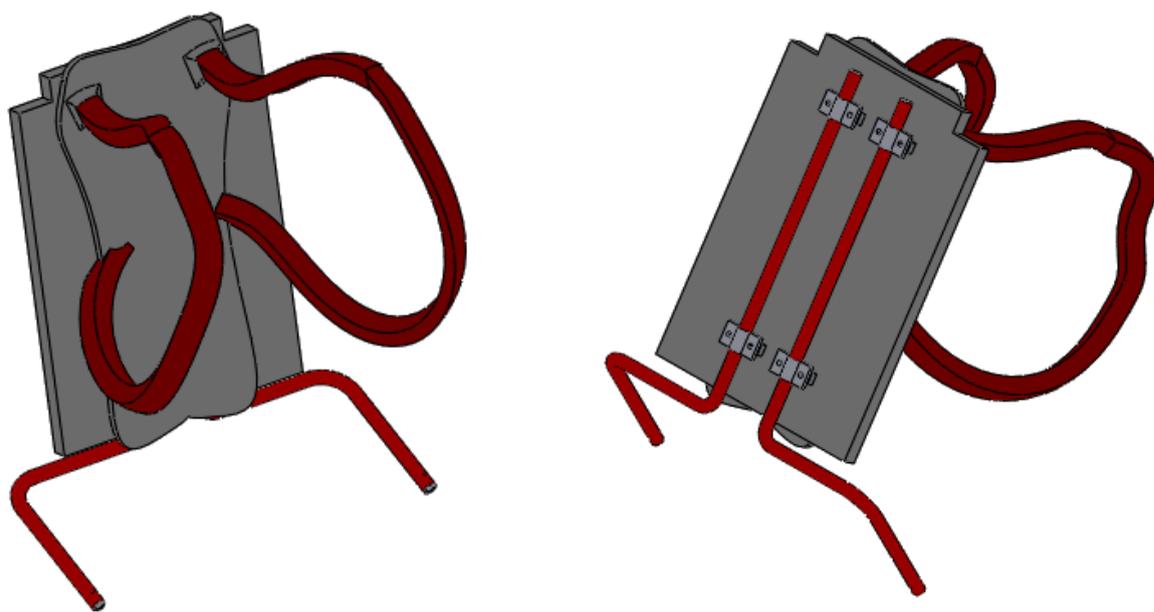


Figura 40-Back-Frame

Si descrive nei prossimi paragrafi l' approccio ingegneristico adottato per ricavare le dimensioni del dispositivo e di tutti i suoi componenti, a partire dal link mobile.



## Approccio ingegneristico Back Frame

Per rendere meno complicata l'analisi strutturale relativa al link mobile, si è deciso di valutare gli sforzi che il back-frame risente, nei tre piani dello spazio:

- Piano  $yx$
- Piano  $yz$
- Piano  $xz$

La situazione più gravosa, è quella per cui la struttura subisce le massime condizioni di carico in quanto sorregge l'uomo quando è fermo nella posizione di piegamento massimo.

Il back frame è stato suddiviso in due elementi che sono simmetrici tra loro. In questo modo è stato possibile valutare metà struttura e studiare il comportamento sotto sforzo. Per poter applicare le regole note della meccanica strutturale, è stato necessario vincolare la struttura e considerare tutte le forze esterne gravanti sul link mobile e derivanti dalla puleggia e dall'attuatore.

Per ciò che riguarda i vincoli:

- Nel piano sagittale, l'estremità della struttura denominata  $O$ , è stata associata ad una **cerniera fissa** dato che l'unico grado di libertà consentito è la rotazione. L'altra estremità denominata  $E$ , quella connessa all'uomo tramite gli spallacci, è stata associata ad un **carrello**, in quanto è impedito il movimento della struttura in direzione verticale.
- Negli altri piani invece, all'estremo  $O$  è stato associato un **incastro**.

L'assegnazione di tali vincoli, ha reso la struttura **isostatica** in tutte le viste considerate.

Per quanto riguarda le forze trasmesse al link mobile dalla puleggia e dall'attuatore, sono state ricavate studiando in maniera distaccata i due componenti. Successivamente, tali forze esterne sono state riportate sulla struttura in verso opposto rispetto a quello ipotizzato.

Le immagini sottostanti chiariscono meglio quanto spiegato.

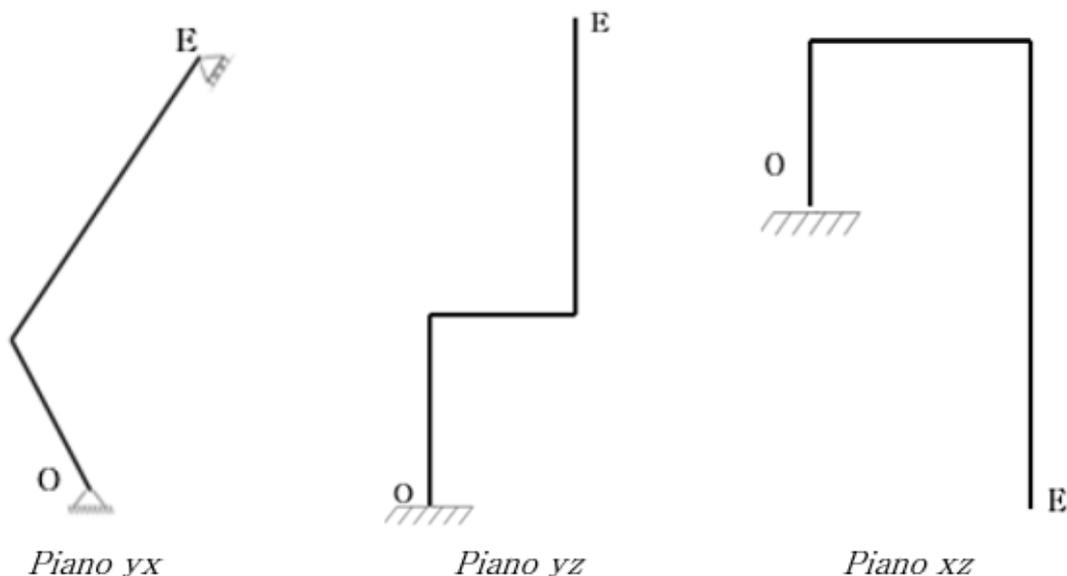


Figura 41-Leg-mobile: viste nello spazio



Dunque, una volta realizzato il modello per poter studiare la struttura, è stata applicata la procedura di calcolo standard per l'individuazione del punto più sollecitato: determinazione delle reazioni vincolari, suddivisione della struttura in campate e rappresentazione del diagramma degli sforzi.

### Calcoli strutturali Back Frame

Analizziamo come anticipato le tensioni agenti sulla struttura mobile nei tre piani.

Piano xy

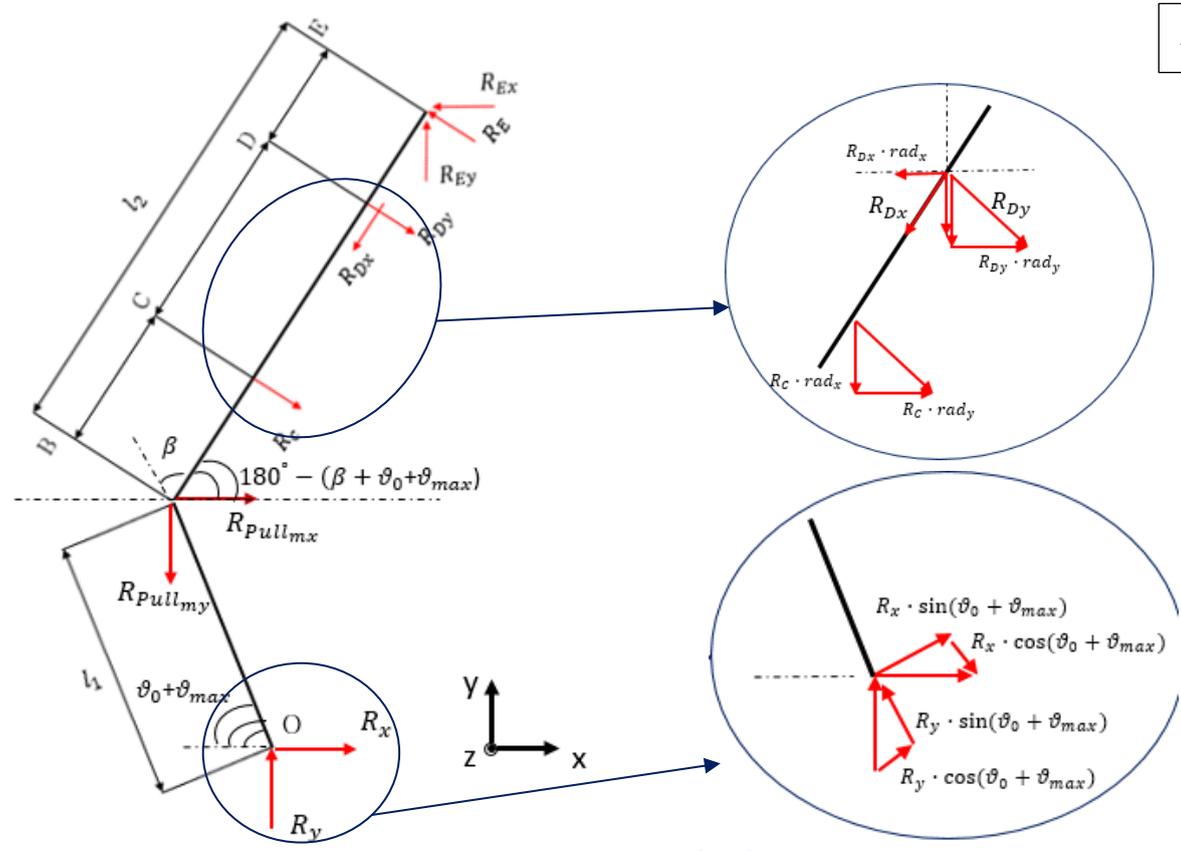


Figura 42-Dcl Back Frame

- Reazioni vincolari

$$\rightarrow R_x = (R_E - R_C - R_{Dy}) \cdot rad_y - R_{pull_{mx}} + R_{Dx} \cdot rad_x = 99.80 \text{ N}$$

$$\uparrow R_y = (-R_E + R_C + R_{Dy}) \cdot rad_x + R_{pull_{my}} + R_{Dx} \cdot rad_y = 282.33 \text{ N}$$

$$R_E = \frac{R_{Dy} \cdot (l_{BC} + l_{CD} + l_1 \cdot \cos \beta) + R_C \cdot (l_{BC} + l_1 \cdot \cos \beta) - R_{pull_{my}} \cdot l_1 \cdot \cos(\vartheta_{max} + \vartheta_0) + R_{pull_{mx}} \cdot l_1 \cdot \sin(\vartheta_{max} + \vartheta_0) - R_{Dx} \cdot l_1 \cdot \sin \beta}{(l_2 + l_1 \cdot \cos \beta)}$$

con:

$$rad_x = \cos(\pi - (\vartheta_0 + \vartheta_{max} + \beta)) = 0.7018$$

$$rad_y = \sin(\pi - (\vartheta_0 + \vartheta_{max} + \beta)) = 0.7124$$

$$R_E = -75.29 \text{ N}$$



Caratteristiche di sollecitazione piano yx

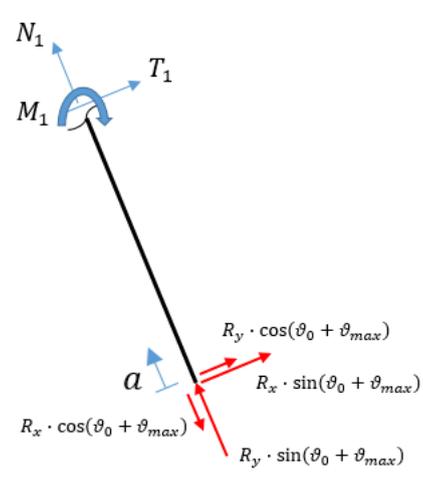
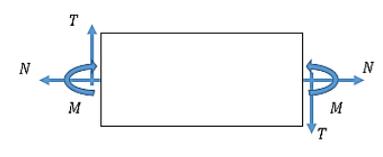


Figura 43- Convenzione utilizzata

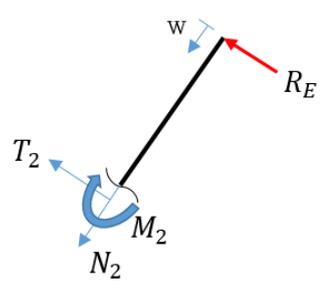


$$0 \leq a \leq l_1$$

$$N_1 = R_x \cdot \cos(\vartheta_{max} + \vartheta_0) - R_y \cdot \sin(\vartheta_{max} + \vartheta_0)$$

$$T_1 = -R_x \cdot \sin(\vartheta_{max} + \vartheta_0) - R_y \cdot \cos(\vartheta_{max} + \vartheta_0)$$

$$M_1 = R_x \cdot \sin(\vartheta_{max} + \vartheta_0) \cdot a + R_y \cdot \cos(\vartheta_{max} + \vartheta_0) \cdot a$$

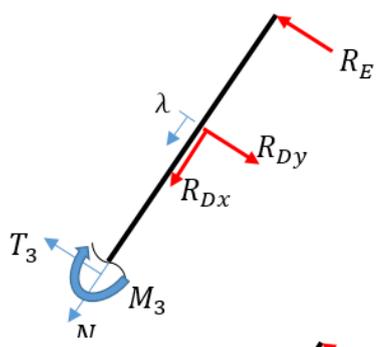


$$0 \leq w \leq l_{DE}$$

$$N_2 = 0$$

$$T_2 = -R_E$$

$$M_2 = R_E \cdot w$$

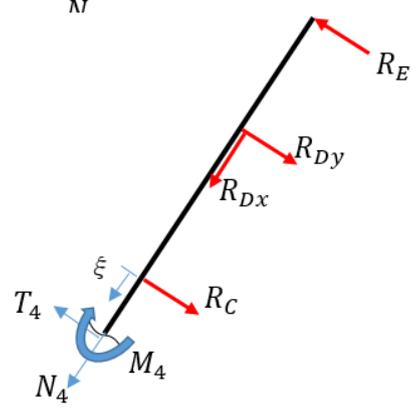


$$0 \leq \lambda \leq l_{CD}$$

$$N_3 = -R_{Dx}$$

$$T_3 = -R_E + R_{Dy}$$

$$M_3 = R_E \cdot (\lambda + l_{DE}) - R_{Dy} \cdot \lambda$$



$$0 \leq \xi \leq l_{BC}$$

$$N_4 = -R_{Dx}$$

$$T_4 = -R_E + R_{Dy} + R_C$$

$$M_4 = -R_{Dy} \cdot (\xi + l_{CD}) + R_E \cdot (\xi + l_{CD} + l_{DE}) - R_C \cdot \xi$$



Fiano yz

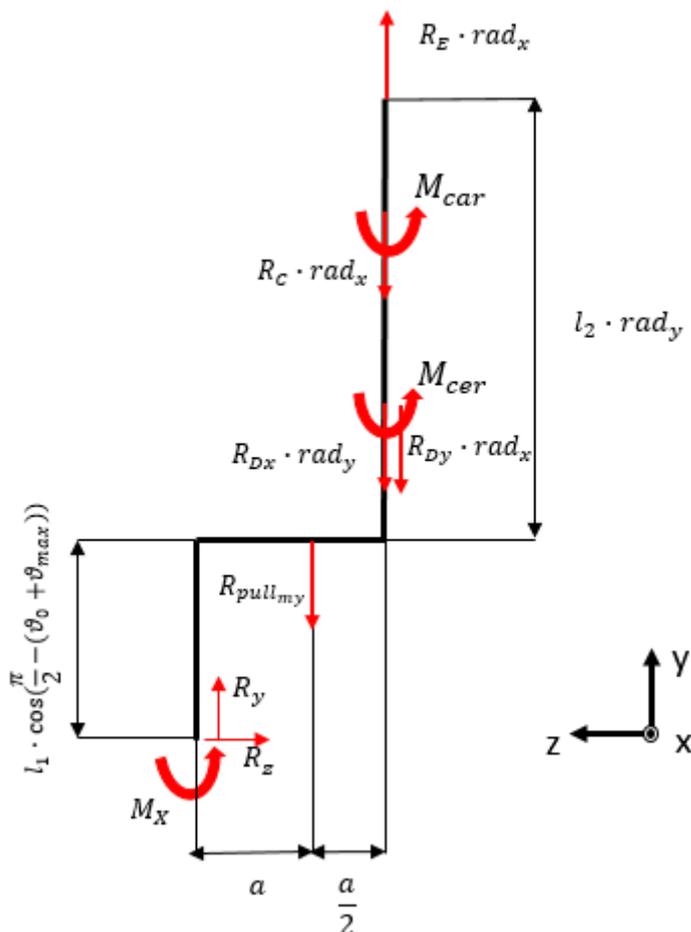


Figura 44-Dcl Back Frame piano yz

- Reazioni vincolari

$$\rightarrow R_z = 0$$

$$\uparrow R_y = (-R_E + R_C + R_{Dy}) \cdot rad_x + R_{pull_{my}} + R_{Dx} \cdot rad_y$$

$$\circlearrowleft M_x = -R_E \cdot rad_x \cdot \left(a + \frac{a}{2}\right) - M_{car} - M_{cer} + R_{pull_{my}} \cdot a + R_C \cdot rad_x \cdot \left(a + \frac{a}{2}\right) + (R_{Dx} \cdot rad_y + R_{Dy} \cdot rad_x) \cdot \left(a + \frac{a}{2}\right)$$

con :

$$a = \frac{L}{4}$$

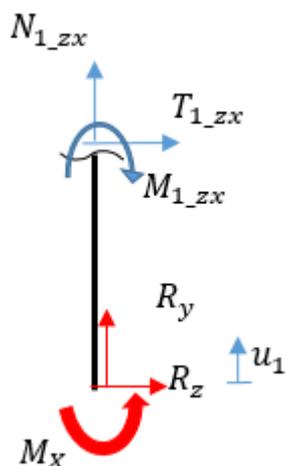
$$M_{car} = R_C \cdot rad_x \cdot \frac{a}{2}$$

$$M_{cer} = R_{Dx} \cdot rad_y \cdot \frac{a}{2} + R_{Dy} \cdot rad_x \cdot \frac{a}{2}$$

$$M_x = 27.27 \text{ Nm}$$



Caratteristiche di sollecitazione piano yz

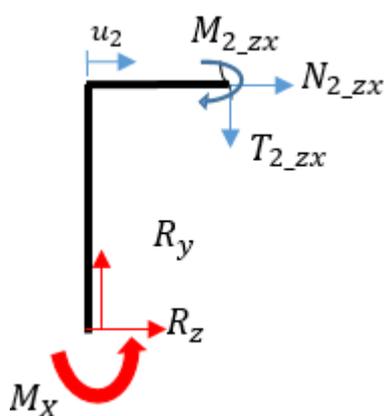


$$0 \leq u_1 \leq l_1 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - (\vartheta_0 + \vartheta_{max})\right)$$

$$N_{1_zx} = -R_y$$

$$T_{1_zx} = 0$$

$$M_{1_zx} = M_x$$

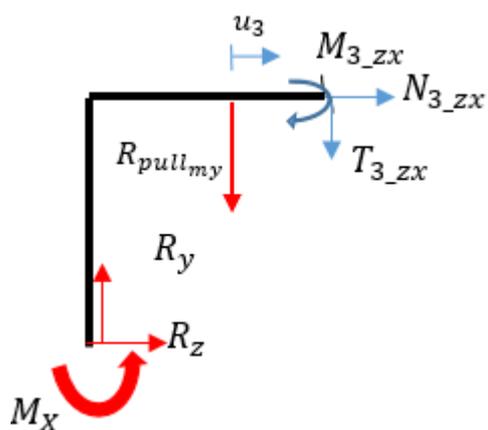


$$0 \leq u_2 \leq a$$

$$N_{2_zx} = 0$$

$$T_{2_zx} = R_y$$

$$M_{2_zx} = M_x - R_y \cdot u_2$$

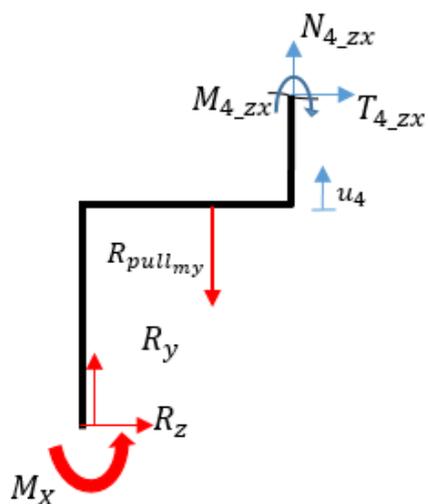


$$0 \leq u_3 \leq \frac{a}{2}$$

$$N_{3_zx} = 0$$

$$T_{3_zx} = R_y - R_{pull_{my}}$$

$$M_{3_zx} = M_x - R_y \cdot (\max(u_2) + u_3) + R_{pull_{my}} \cdot u_3$$

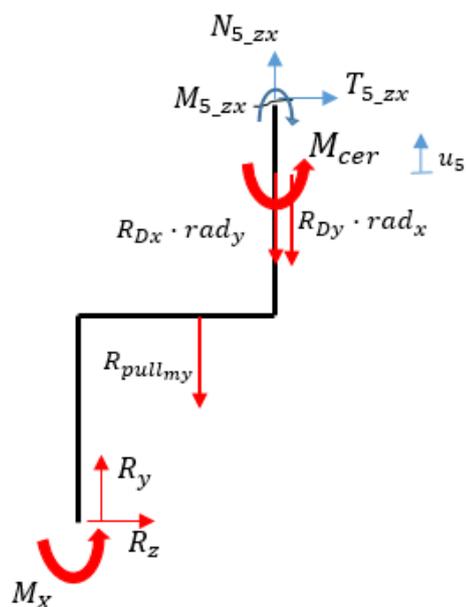


$$0 \leq u_4 \leq \frac{l_2 \cdot \text{rad}_y}{4}$$

$$N_{4zx} = -R_y + R_{\text{pull}_{my}}$$

$$T_{4zx} = 0$$

$$M_{4zx} = M_x - R_y \cdot (\max(u_2) + \max(u_3)) + R_{\text{pull}_{my}} \cdot (\max(u_3))$$

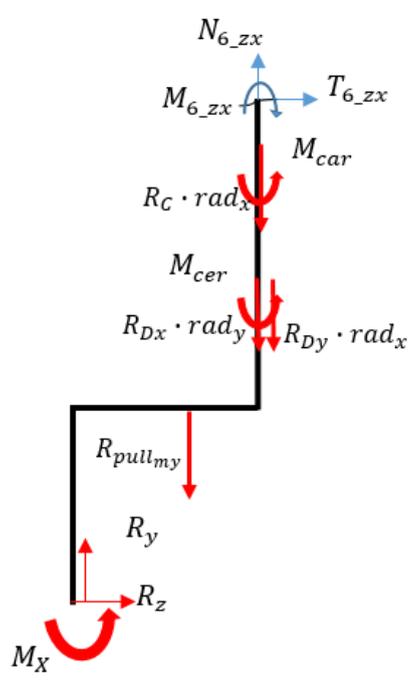


$$0 \leq u_5 \leq l_{\text{cilindro}}$$

$$N_{5zx} = -R_y + R_{\text{pull}_{my}} + R_{Dx} \cdot \text{rad}_y + R_{Dy} \cdot \text{rad}_x$$

$$T_{5zx} = 0$$

$$M_{5zx} = M_x - R_y \cdot (\max(u_2) + \max(u_3)) + R_{\text{pull}_{my}} \cdot (\max(u_3)) + M_{\text{cer}}$$



$$N_{6_{zx}} = -R_y + R_{pull_{my}} + R_{Dx} \cdot rad_y + R_{Dy} \cdot rad_x + R_C \cdot rad_x$$

$$T_{6_{zx}} = 0$$

$$M_{6_{zx}} = M_x - R_y \cdot (\max(u_2) + \max(u_3)) + R_{pull_{my}} \cdot (\max(u_3)) + M_{cer} + M_{car}$$

Fiano xz

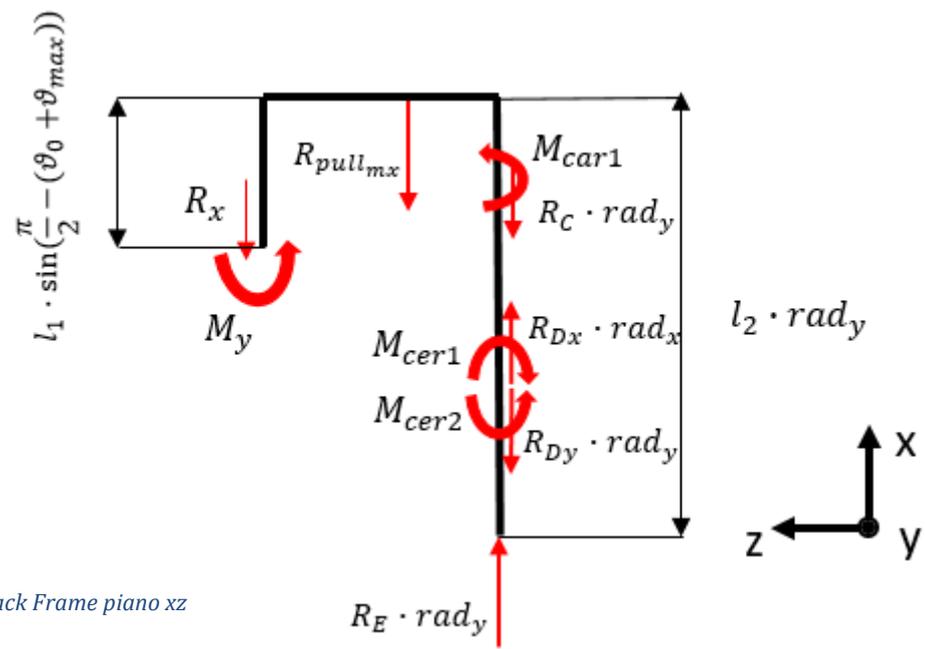


Figura 45-Dcl Back Frame piano xz

- Reazioni vincolari

$$M_y = -R_E \cdot rad_y \cdot \left(a + \frac{a}{2}\right) - M_{car1} + M_{cer1} - M_{cer2} + R_{pull_{mx}} \cdot a = 6.45 \text{ Nm}$$



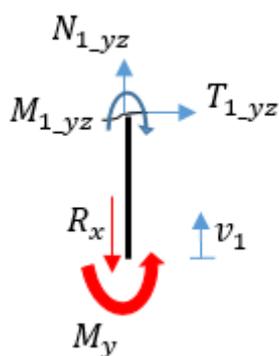
con:

$$M_{car1} = R_c \cdot rad_y \cdot \frac{a}{2}$$

$$M_{cer1} = R_{Dx} \cdot rad_x \cdot \frac{a}{2}$$

$$M_{cer2} = R_{Dy} \cdot rad_y \cdot \frac{a}{2}$$

Caratteristiche di sollecitazione piano xz

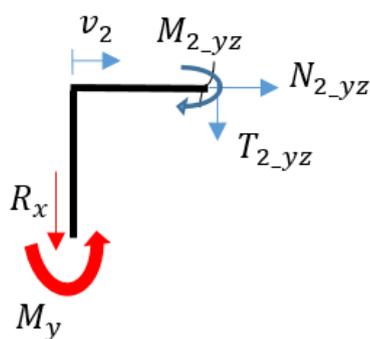


$$0 \leq v_1 \leq l_1 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - (\vartheta_0 + \vartheta_{max})\right)$$

$$N_{1,yz} = R_x$$

$$T_{1,yz} = 0$$

$$M_{1,yz} = M_y$$

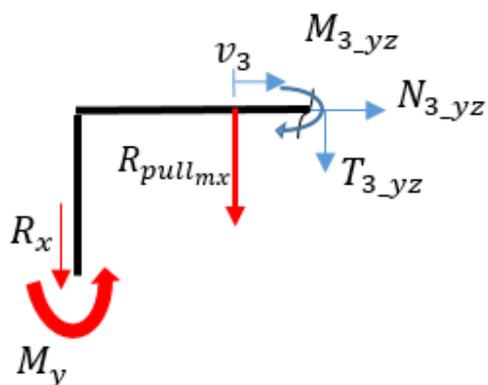


$$0 \leq v_2 \leq a$$

$$N_{2,yz} = 0$$

$$T_{2,yz} = -R_x$$

$$M_{2,yz} = M_y + R_x \cdot v_2$$

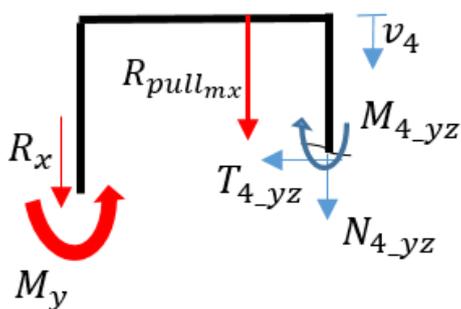


$$0 \leq v_3 \leq \frac{a}{2}$$

$$N_{3,yz} = 0$$

$$T_{3,yz} = -R_x - R_{pull_{mx}}$$

$$M_{3,yz} = M_y + R_x \cdot (\max(v_2) + v_3) + R_{pull_{mx}} \cdot v_3$$

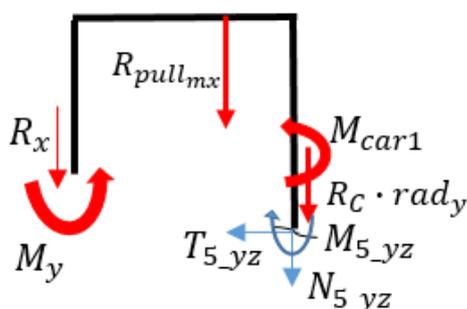


$$0 \leq v_4 \leq \frac{l_2 \cdot \text{rad}_x}{4}$$

$$N_{4,yz} = -R_y - R_{pull_{mx}}$$

$$T_{4,yz} = 0$$

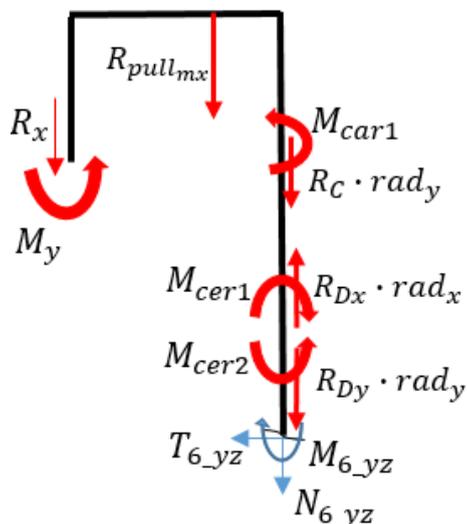
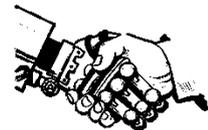
$$M_{4,yz} = M_y + R_x \cdot (\max(v_2) + \max(v_3)) + R_{pull_{mx}} \cdot (\max(u_3))$$



$$N_{5,yz} = -R_x - R_{pull_{mx}} - R_C \cdot \text{rad}_y$$

$$T_{5,yz} = 0$$

$$M_{5,yz} = M_y + R_x \cdot (\max(v_2) + \max(v_3)) + R_{pull_{mx}} \cdot (\max(u_3)) + M_{car1}$$



$$N_{6_{yz}} = -R_x - R_{pull_{mx}} - R_{Dx} \cdot rad_x - R_{Dy} \cdot rad_y - R_C \cdot rad_y$$

$$T_{6_{yz}} = 0$$

$$M_{6_{yz}} = M_y + R_y \cdot (\max(v_2) + \max(v_3)) + R_{pull_{mx}} \cdot (\max(v_3)) + M_{car1} + M_{cer2} - M_{cer1}$$

Nel prossimo paragrafo verranno illustrati i diagrammi degli sforzi del back frame nelle tre viste dello spazio.

È bene precisare che per verificare la coerenza dei calcoli strutturali è stato utilizzato il software [Ftool](#).

Tramite tale piattaforma è stato possibile:

- Disegnare la struttura, rispettando le lunghezze imposte o ottenute teoricamente;
- Scegliere il materiale;
- Impostare i vincoli;
- Applicare i carichi;
- Generare i diagrammi degli sforzi e confrontare il valore delle tensioni (reazioni vincolari, sforzo normale, taglio e momento) con i risultati analitici.

La procedura è stata ripetuta per tutti gli elementi strutturali dell' esoscheletro e per ogni vista dello spazio.



## Diagrammi degli sforzi Back Frame

Piano  $yx$

N

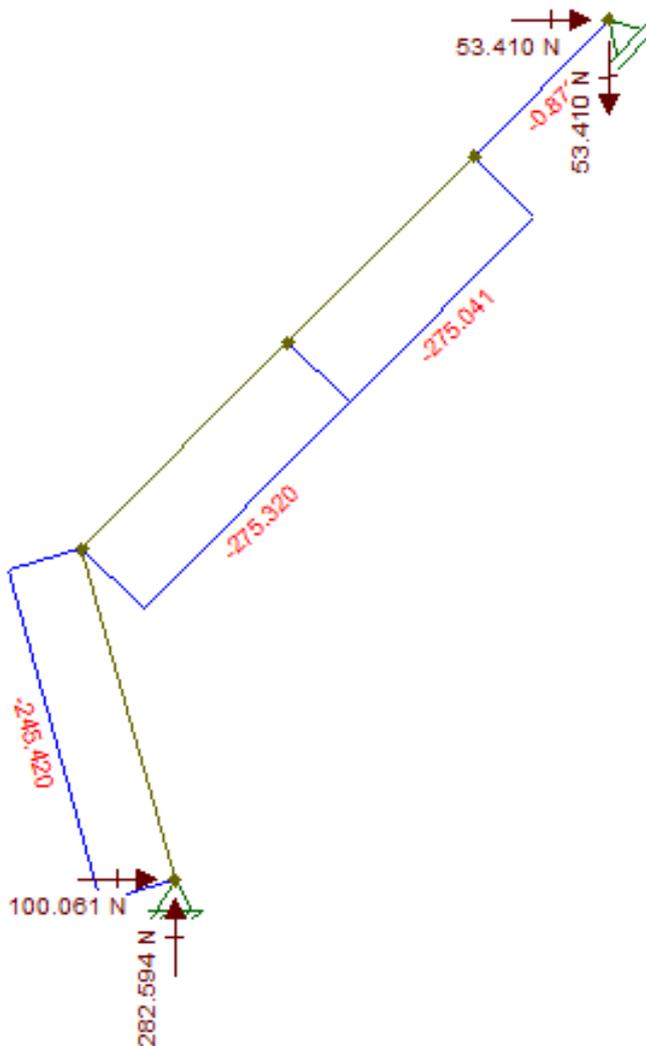


Figura 46-Sforzo normale piano  $yx$



T

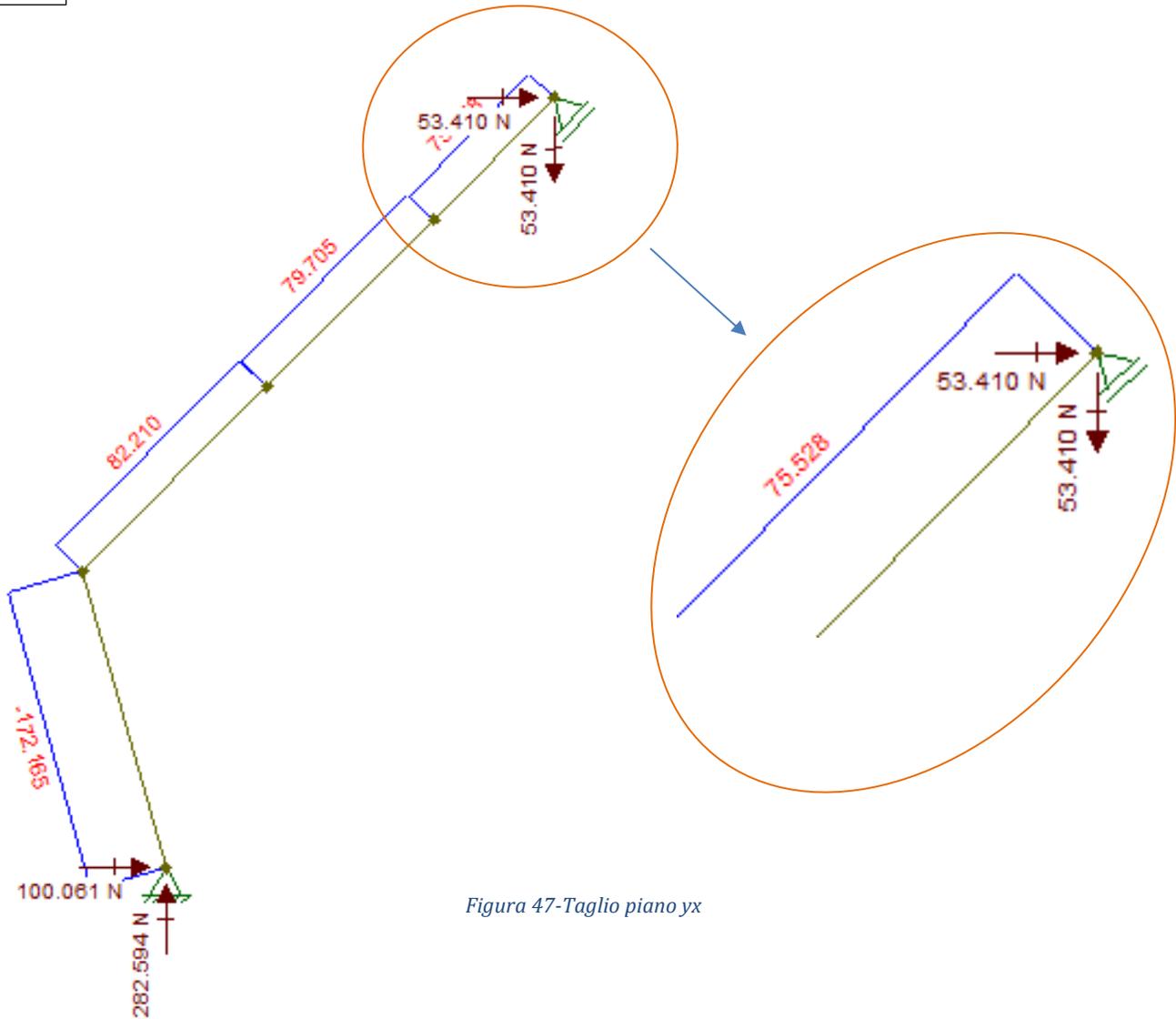


Figura 47-Taglio piano yx



M

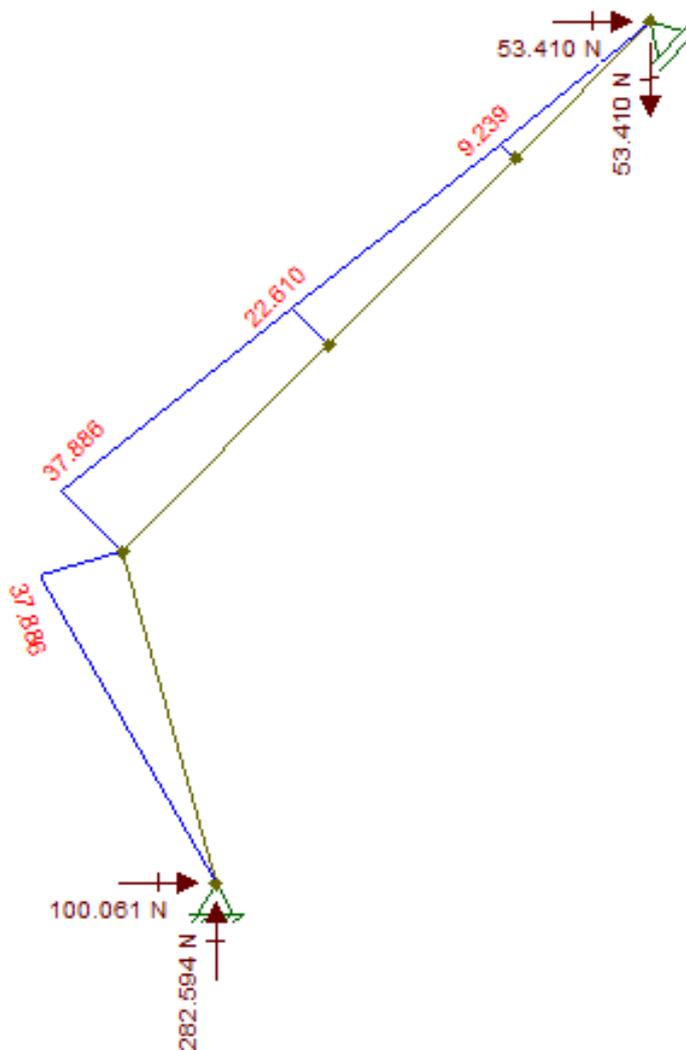


Figura 48-Momento flettente piano yx



Piano yz

N

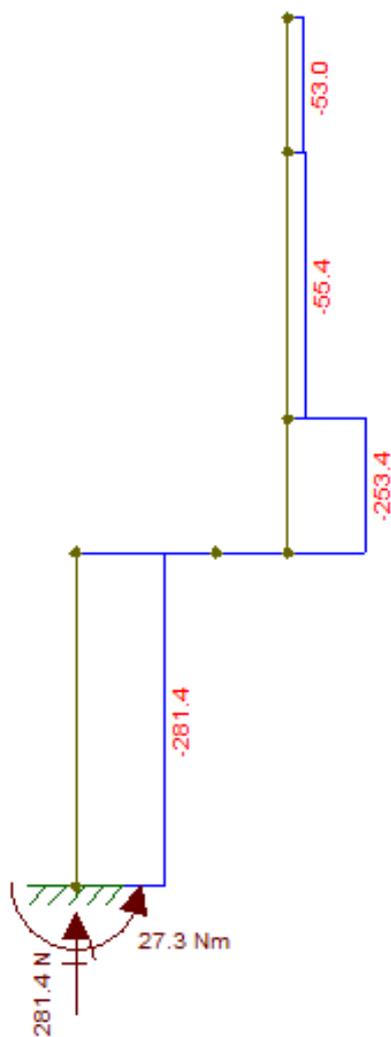


Figura 49-Sforzo normale piano yz



T

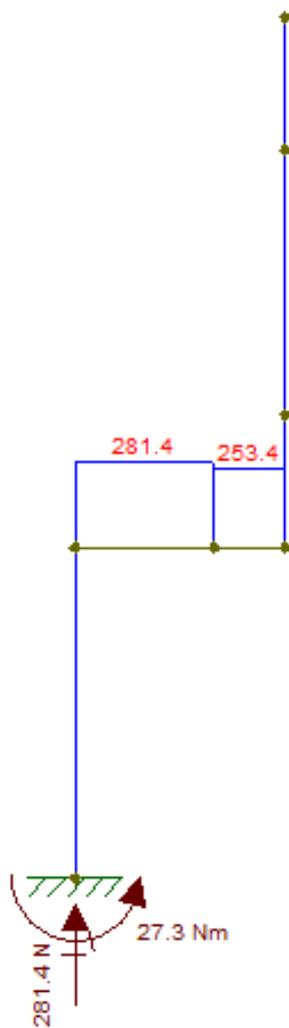


Figura 50-Taglio piano yz



M

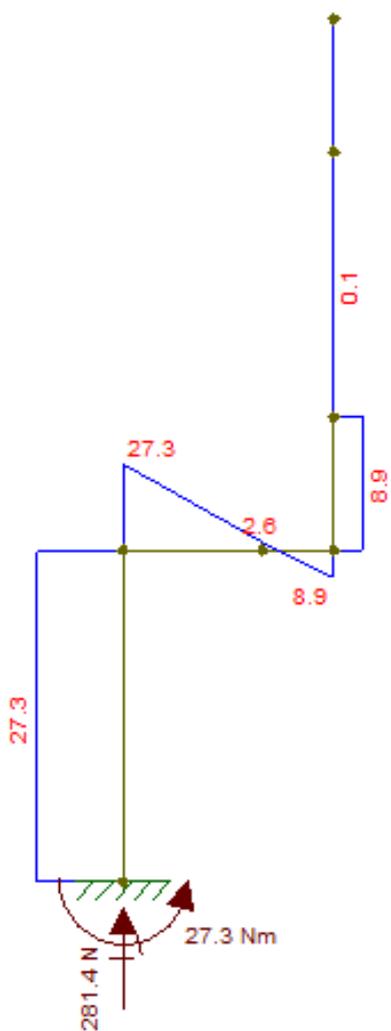


Figura 51-Momento flettente piano yz



Piano xz

N

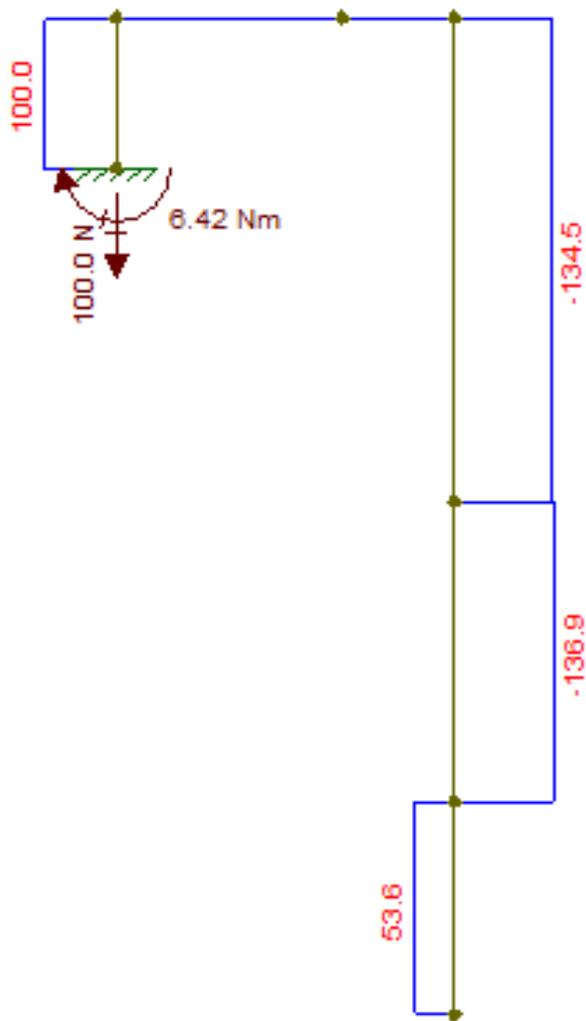


Figura 52-Sforzo normale piano xz



T

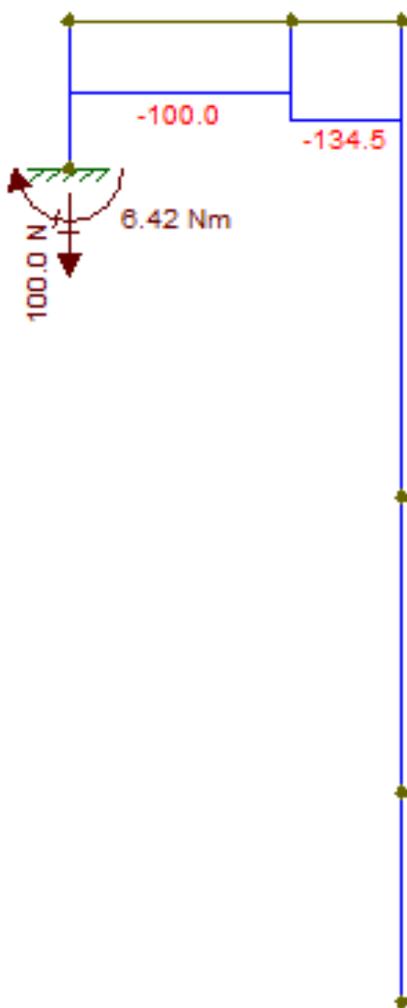


Figura 53-Taglio piano xz



M

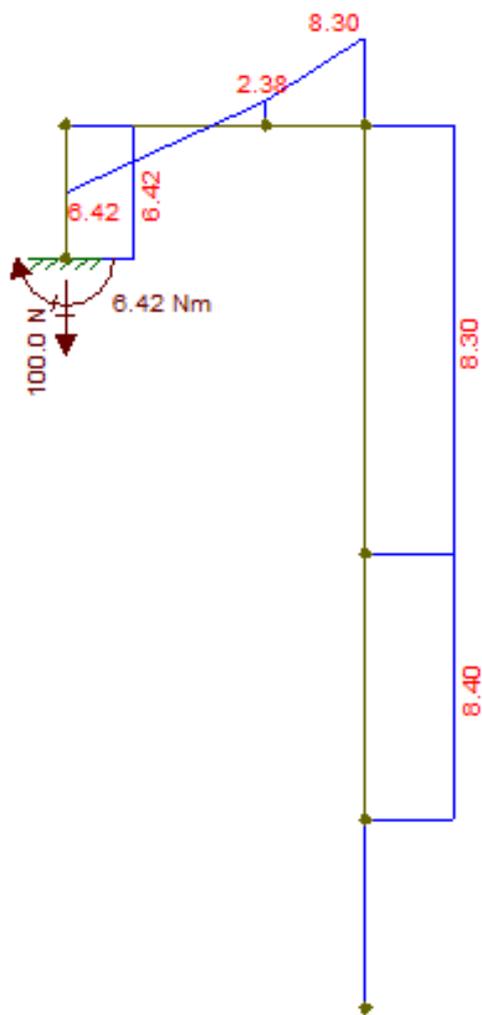


Figura 54-Momento flettente piano xz



Si illustrano nei prossimi paragrafi le forze esterne agenti sui restanti componenti connessi al link mobile.

### Diagramma di corpo libero puleggia

Affinchè si potessero ricavare i diagrammi appena illustrate, è stato necessario ricorrere al diagramma di corpo libero della puleggia, in modo da ricavare in modulo direzione e verso le forze di reazione gravanti sulla struttura.

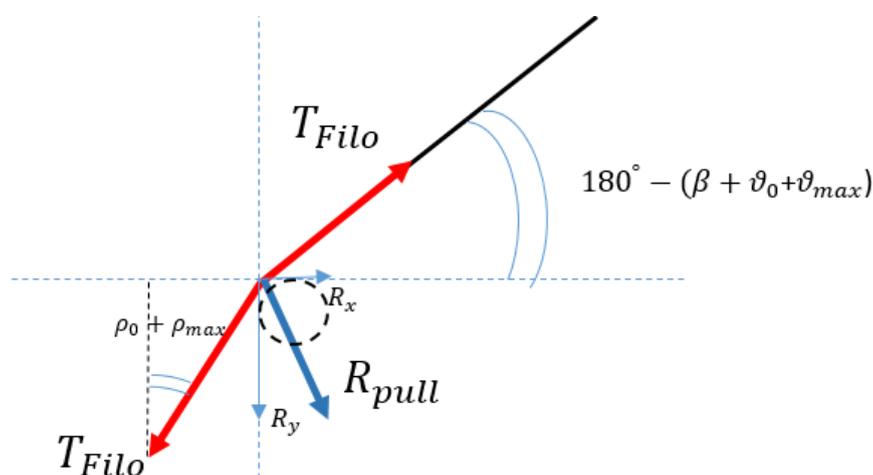


Figura 55-Dcl puleggia Back Frame

Per semplicità, tali forze sono state ricavate considerando le pulegge prive di raggio. Effettuando l'equilibrio lungo l'orizzontale e la verticale, si ottengono:

$$R_{pull\_my} = -T_{Filo} \cdot \sin(180 - \beta - \vartheta - \vartheta_0) + T_{Filo} \cdot \cos(\rho + \rho_0) = 28.74 \text{ N}$$

$$R_{pull\_mx} = -T_{Filo} \cdot \cos(180 - \beta - \vartheta - \vartheta_0) - T_{Filo} \cdot \sin(\rho + \rho_0) = 34.55 \text{ N}$$



## Reazioni agenti sull' attuatore

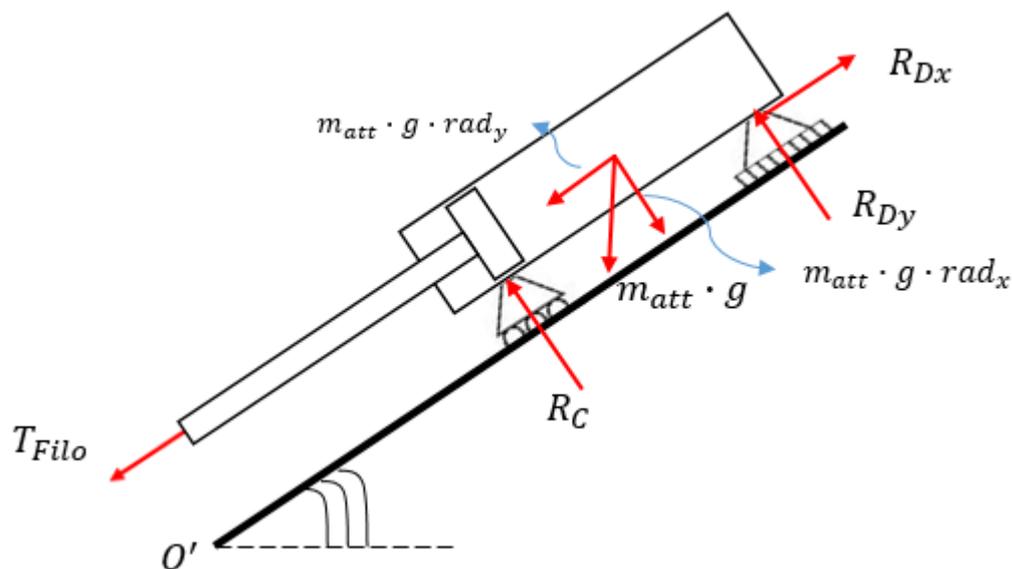


Figura 56-Reazioni agenti sull'attuatore

In figura viene illustrato il diagramma di corpo libero dell' attuatore nella fase di flessione massima.

Per rendere fattibile l' analisi e quindi per ricavare le tensioni che si trasmettono sul back frame, gli appoggi su cui viene fissato l' attuatore sono stati modellizzati con carrello e cerniera fissa. Scrivendo le equazioni di equilibrio si è ottenuto:

$$R_{Dx} = m_{att} \cdot g \cdot rad_y + \max(T_{Filo}) = 274.93 \text{ N}$$

$$R_{Dy} = m_{att} \cdot g \cdot rad_x - R_C = 3.482 \text{ N}$$

$$R_C = \frac{1}{2} \cdot m_{att} \cdot g \cdot rad_x = 3.482 \text{ N}$$

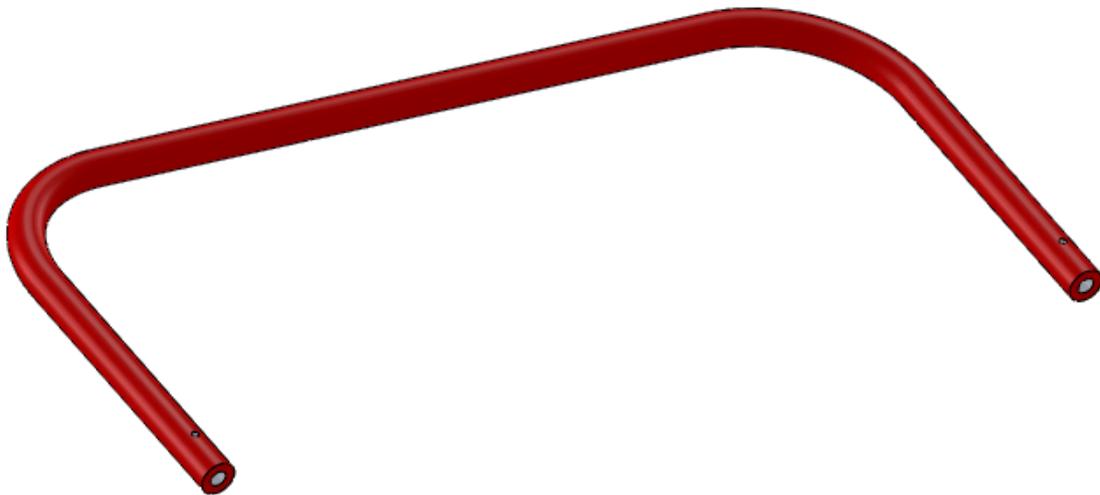
Il verso di tali forze è stato considerato opposto nella valutazione delle sollecitazioni gravanti sulla struttura.



## CAPITOLO IV

### Link – fisso

*Il secondo link caratterizzante la struttura è il link fisso. Rispetto agli altri elementi, non segue l' operatore durante il piegamento. Costituisce la sede per le altre due pulegge che contribuiscono a tenere in tensione il filo e tramite un ulteriore giunto progettato appositamente per il link fisso, viene collegato allo stesso perno utilizzato per il link mobile, dunque il collegamento al bacino segue lo stesso ragionamento.*



*Figura 57-Leg-Fisso*

*Pur non essendo il componente centrale della struttura, questo elemento non è stato di facile trattazione.*

*Nel prossimo paragrafo saranno descritte le considerazioni adottate e i vari step per il dimensionamento del link fisso.*



## Approccio ingegneristico Link Fisso

L' approccio utilizzato per il dimensionamento del link fisso ricorda quello affrontato per il componente mobile. Analizzare la struttura nelle tre viste dello spazio e assegnare dei vincoli agli estremi della stessa, si è rivelato necessario anche in questo caso.

In ogni vista dello spazio, la struttura risulta **incastrata** agli estremi.

Tuttavia, se nel caso del link mobile lo studio delle campate e dei diagrammi di sollecitazione si è dimostrato più semplice in quanto struttura isostatica, per il link fisso non è stato così immediato.

Ribaltando l' elemento prima nel piano  $yx$ , poi nel piano  $yz$  ed infine nel piano  $xz$ , si nota come la struttura assuma la condizione isostatica nel primo caso ed iperstatica negli altri due. Le immagini illustrano tali condizioni.

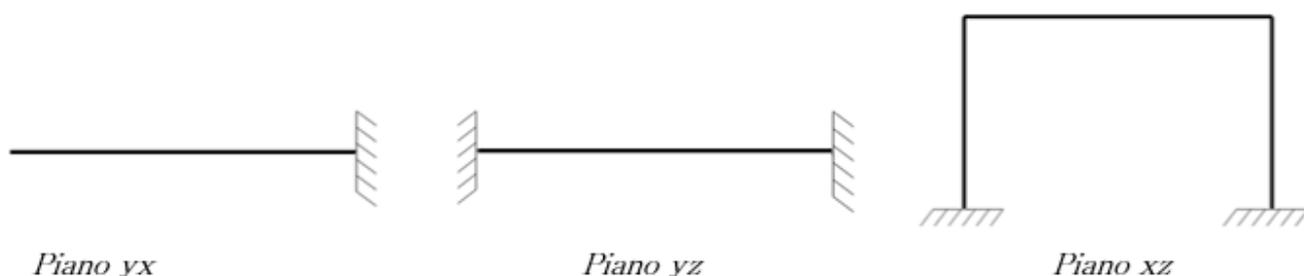


Figura 58-Leg-fisso: viste nello spazio

A differenza dello studio effettuato per il piano  $yx$ , in cui si è adottato il procedimento classico per una trave incastrata, quello relativo ai piani  $yz$  ed  $xz$  ha richiesto maggior attenzione.

Nel prossimo paragrafo, come precedentemente fatto saranno illustrati i calcoli relativi ad ogni piano.

## Calcoli strutturali Link Fisso

Piano  $yx$

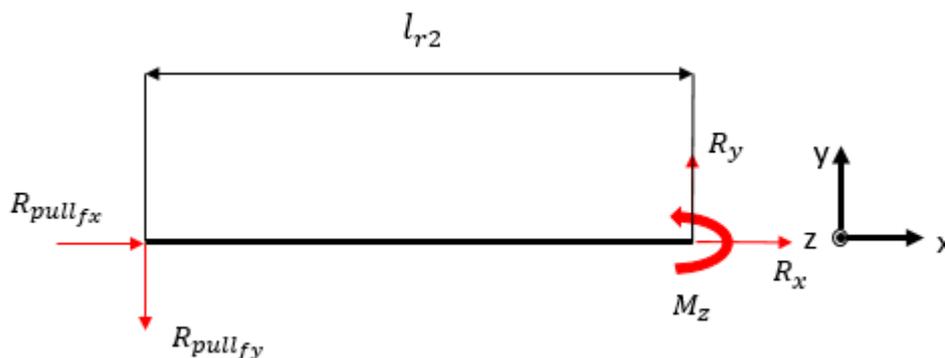
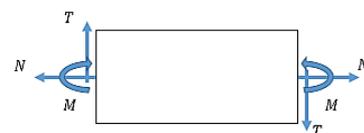
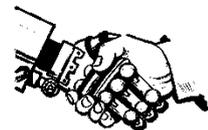


Figura 59-Reazioni Leg Fisso piano  $yx$



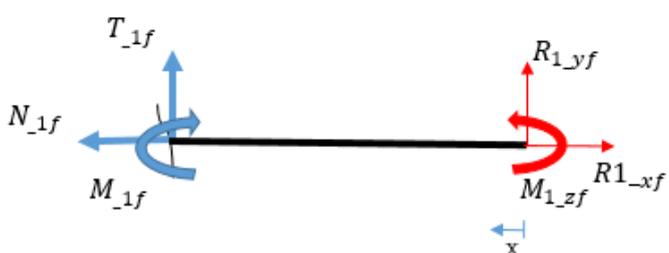
• Reazioni vincolari

$$R_y = R_{pull_{fy}}$$

$$R_x = -R_{pull_{fx}}$$

$$M_z = -R_{pull_{fy}} \cdot l_{r2} = -4.99 \text{ Nm}$$

Caratteristiche di sollecitazione piano  $yx$



$$0 \leq x \leq l_{r2}$$

$$N_{1f} = R_{1xf}$$

$$T_{1f} = -R_{1yf}$$

$$M_{1zf} = M_z - R_{1yf} \cdot x$$

Calcoli strutturali piano  $yz$

Per ciò che riguarda la vista nel piano  $yz$ , il procedimento impiegato prevede i seguenti passaggi:

- Disegno della struttura con tutti i carichi gravanti su di essa (interni ed esterni);
- Calcolo delle reazioni vincolari ed individuazione delle tensioni incognite;
- Applicazione del principio di sovrapposizione degli effetti:
  - a) suddivisione della struttura in sotto strutture avente i carichi correttamente distribuiti sulle stesse
  - b) calcolo delle equazioni della rotazione e della freccia per ogni sotto struttura
  - c) sommatoria dei singoli contributi delle sottostrutture rispettivamente per l'equazione della rotazione e della freccia applicando le condizioni al contorno
- Sostituzione delle tensioni ottenute, nell'equazione iniziale delle reazioni vincolari;
- Determinazione di tutte le tensioni gravanti sulla struttura completa;

Riportiamo qui di seguito quanto descritto.

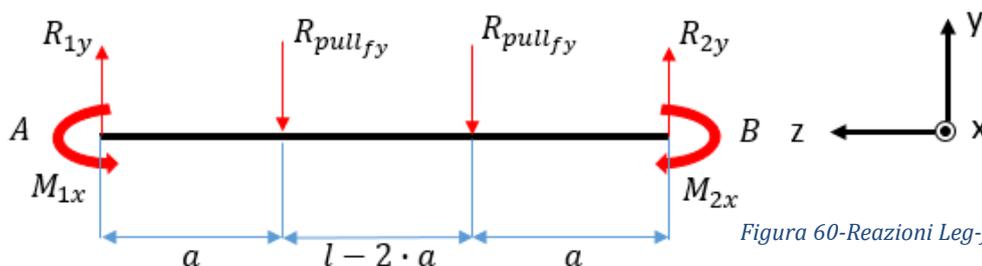


Figura 60-Reazioni Leg-fisso piano  $xz$

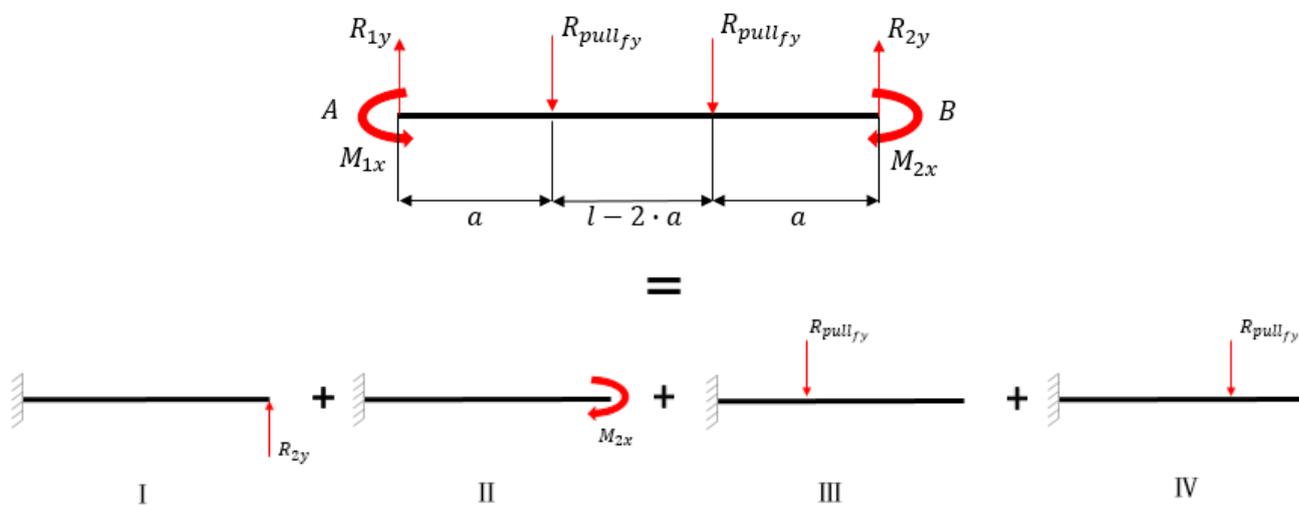


• Reazioni vincolari

$$\uparrow R_{1y} + R_{2y} = R_{pull_{fy}} + R_{pull_{fy}}$$

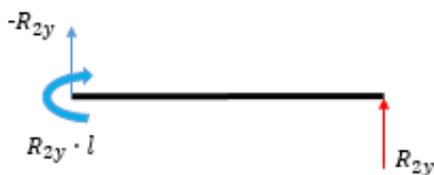
$$A \curvearrowright M_{1x} - M_{2x} - R_{pull_{fy}} \cdot a - R_{pull_{fy}} \cdot (l - a) + R_{2y} \cdot l = 0$$

Le equazioni ottenute sono 2 ma risultano 4 incognite. E' necessario dunque ricorrere alle equazioni relative alla rotazione e freccia della trave. Appliciamo il principio di sovrapposizione:



Calcolo delle equazioni della rotazione e della freccia.

I



$$N = 0$$

$$T = -R_{2y}$$

$$M = R_{2y} \cdot (l - x)$$

• Eq. Linea elastica

$$E \cdot J \cdot y''_I = -M = R_{2y} \cdot (x - l)$$

$$E \cdot J \cdot y'_I = R_{2y} \cdot \frac{x^2}{2} - R_{2y} \cdot l \cdot x + C_1$$

$$E \cdot J \cdot y_I = R_{2y} \cdot \frac{x^3}{6} - R_{2y} \cdot l \cdot \frac{x^2}{2} + C_1 \cdot x + C_2$$



In  $x = l$

$$E \cdot J \cdot y'_I = R_{2y} \cdot \frac{l^2}{2} - R_{2y} \cdot l^2 \quad \text{equazione rotazione}$$

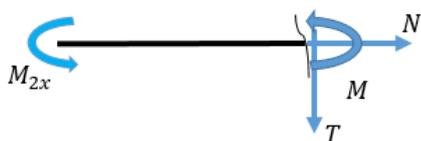
$$E \cdot J \cdot y_I = R_{2y} \cdot \frac{l^3}{6} - R_{2y} \cdot \frac{l^3}{2} \quad \text{equazione freccia}$$

II



$$N = 0$$

$$T = 0$$



$$M = -M_{2x}$$

- Eq. linea elastica

$$E \cdot J \cdot y''_{II} = -M = M_{2x}$$

$$E \cdot J \cdot y'_{II} = M_{2x} \cdot x + C_1$$

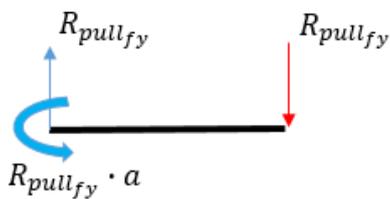
$$E \cdot J \cdot y_{II} = M_{2x} \cdot \frac{x^2}{2} + C_1 \cdot x + C_2$$

In  $x = l$

$$E \cdot J \cdot y'_{II} = M_{2x} \cdot l$$

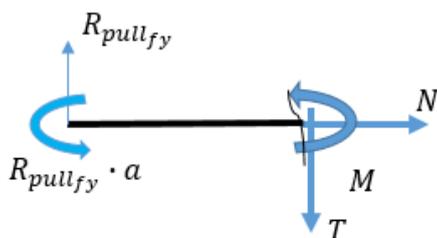
$$E \cdot J \cdot y_{II} = M_{2x} \cdot \frac{l^2}{2}$$

III



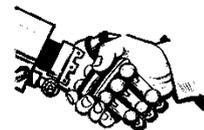
$$N = 0$$

$$T = R_{pull_{fy}}$$



$$M = R_{pull_{fy}} \cdot (x - a)$$

- Equazione linea elastica



$$E \cdot J \cdot y''' = R_{pull_{fy}} \cdot (a - x)$$

$$E \cdot J \cdot y'' = R_{pull_{fy}} \cdot a \cdot x - R_{pull_{fy}} \cdot \frac{x^2}{2} + C_1$$

$$E \cdot J \cdot y' = R_{pull_{fy}} \cdot a \cdot \frac{x^2}{2} - R_{pull_{fy}} \cdot a \cdot \frac{x^3}{6} + C_1 \cdot x + C_2$$

In  $x = a$

$$E \cdot J \cdot y''' = R_{pull_{fy}} \cdot a^2 - R_{pull_{fy}} \cdot \frac{a^2}{2}$$

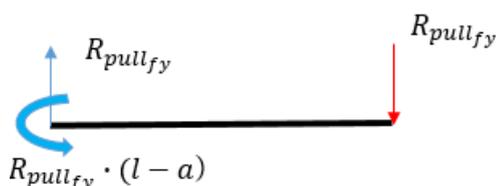
$$E \cdot J \cdot y'' = R_{pull_{fy}} \cdot \frac{a^3}{2} - R_{pull_{fy}} \cdot \frac{a^3}{6}$$

In  $x = l$

$$y'''(a) = y'''(l)$$

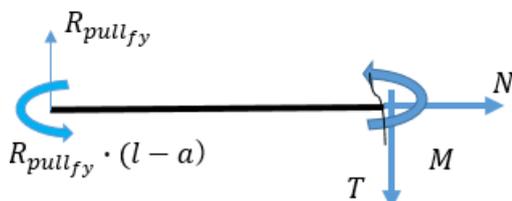
$$y''(l) = y''(a) + y'''(a) \cdot (l - a) = R_{pull_{fy}} \cdot \left( \frac{a^2}{2} \cdot l - \frac{a^3}{6} \right)$$

IV



$$N = 0$$

$$T = R_{pull_{fy}}$$



$$M = R_{pull_{fy}} \cdot (x - l + a)$$

- Equazione linea elastica

$$E \cdot J \cdot y''' = R_{pull_{fy}} \cdot (l - a - x)$$

$$E \cdot J \cdot y'' = R_{pull_{fy}} \cdot l \cdot x - R_{pull_{fy}} \cdot a \cdot x - R_{pull_{fy}} \cdot \frac{x^2}{2} + C_1$$

$$E \cdot J \cdot y' = R_{pull_{fy}} \cdot l \cdot \frac{x^2}{2} - R_{pull_{fy}} \cdot a \cdot \frac{x^2}{2} - R_{pull_{fy}} \cdot \frac{x^3}{6} + C_1 \cdot x + C_2$$

In  $x = l$

$$y'''(l-a) = y'''(l)$$

$$y''(l) = y''(l-a) + y'''(l-a) \cdot a = \frac{R_{pull_{fy}}}{6} \cdot (l-a)^2 (2 \cdot l + a)$$



Come si nota dalle equazioni inserite, le costanti  $C_1$  e  $C_2$  sono state considerate nulle in quanto tali nelle condizioni al contorno imposte.

Si nota inoltre che per le campate III e IV, la rotazione è stata assunta pari alla rotazione della campata successiva, mentre la freccia è il risultato di due contributi: il primo legato alla freccia della campata precedente, il secondo relativo al prodotto tra la rotazione della campata precedente e la distanza della restante parte di trave.

Andiamo adesso a riepilogare le equazioni ottenute, riducendole in espressioni più semplici:

CAMPATE	DISTANZE TRAVE	
	$x = a$	$x = l$
I	/	$E \cdot J \cdot y'_I = -R_{2y} \cdot \frac{l^2}{2}$ $E \cdot J \cdot y_I = -R_{2y} \cdot \frac{l^3}{3}$
II	/	$E \cdot J \cdot y'_{II} = M_{2x} \cdot l$ $E \cdot J \cdot y_{II} = M_{2x} \cdot \frac{l^2}{2}$
III	$E \cdot J \cdot y'_{III} = R_{pullfy} \cdot \frac{a^2}{2}$ $E \cdot J \cdot y_{III} = R_{pullfy} \cdot \frac{a^3}{3}$	$y'_{III}(a) = y'_{III}(l)$ $E \cdot J \cdot y_{III} = R_{pullfy} \cdot \frac{a^2}{6} \cdot (3 \cdot l - a)$
IV	$E \cdot J \cdot y'_{IV} = R_{pullfy} \cdot \frac{(l-a)^2}{2}$ $E \cdot J \cdot y_{IV} = \frac{R_{pullfy}}{3} \cdot (l-a)^3$	$y'_{IV}(l-a) = y'_{IV}(l)$ $E \cdot J \cdot y_{IV} = \frac{R_{pullfy}}{6} \cdot (l-a)^2 \cdot (2 \cdot l + a)$

Figura 61-Riassunto dei risultati ottenuti nelle 4 campate

A questo punto andiamo a sommare i contributi di ogni campata sia per quanto riguarda la rotazione che la freccia in  $x = l$ , ponendo tale somma pari a 0.

$$\left\{ \begin{array}{l} y'_I + y'_{II} + y'_{III} + y'_{IV} = 0 \quad \longrightarrow \quad -R_{2y} \cdot \frac{l^2}{2} + M_{2x} \cdot l + R_{pullfy} \cdot \frac{a^2}{2} + R_{pullfy} \cdot \frac{(l-a)^2}{2} = 0 \\ y_I + y_{II} + y_{III} + y_{IV} = 0 \quad \longrightarrow \quad -R_{2y} \cdot \frac{l^3}{3} + M_{2x} \cdot \frac{l^2}{2} + R_{pullfy} \cdot \frac{a^2}{6} \cdot (3 \cdot l - a) + \frac{R_{pullfy}}{6} \cdot (l-a)^2 \cdot (2 \cdot l + a) = 0 \end{array} \right.$$

Dall' equazione della rotazione si ricava:



$$M_{2x} = R_{2y} \cdot \frac{l}{2} - R_{pull_{fy}} \cdot \frac{a^2}{2 \cdot l} - R_{pull_{fy}} \cdot \frac{(l-a)^2}{2 \cdot l}$$

Sostituendo tale quantità nell' equazione della freccia si trova:

$$-R_{2y} \cdot \frac{l^2}{2} + (R_{2y} \cdot \frac{l}{2} - R_{pull_{fy}} \cdot \frac{a^2}{2 \cdot l} - R_{pull_{fy}} \cdot \frac{(l-a)^2}{2 \cdot l}) \cdot l + R_{pull_{fy}} \cdot \frac{a^2}{2} + R_{pull_{fy}} \cdot \frac{(l-a)^2}{2} = 0$$

da cui:

$$R_{2y} = R_{pull_{fy}}$$

Andando a sostituire tale valore in tutte le altre equazioni considerate, si ottengono le incognite cercate:

$$R_{1y} = R_{pull_{fy}}$$
$$M_{2x} = R_{pull_{fy}} \cdot (a - \frac{a^2}{l})$$

$$M_{2x} = M_{1x} = 1.6 Nm$$

### Calcoli strutturali piano xz

Nel piano xz, il link fisso si presenta come una struttura a portale (composto da due piedritti e una traversa) doppiamente incastrata. In questa fase è stato essenziale consultare il libro "Cavallina-Metodo cinematico-Vol.2" che ha permesso di risolvere il portale in maniera semplificata.

Anche in questo caso il primo passaggio è stato quello di indicare sul portale tutte le forze presenti, sia interne che esterne. In seguito al calcolo dei gradi di libertà, si è ricavato che la struttura fosse tre volte iperstatica ma soltanto due volte indeterminata.

Infatti, la simmetria della geometria ha permesso di considerare le reazioni vincolari lungo l'asse x pari alle forze esterne derivanti dalle pulegge.

Il ragionamento si è quindi focalizzato sulla determinazione delle restanti reazioni incognite: i momenti all'incastro e le spinte assiali. Solo per questo caso è stata adottata una nomenclatura differente che sarà chiarita alla fine del paragrafo.

Di seguito l'immagine che illustra quanto appena descritto.

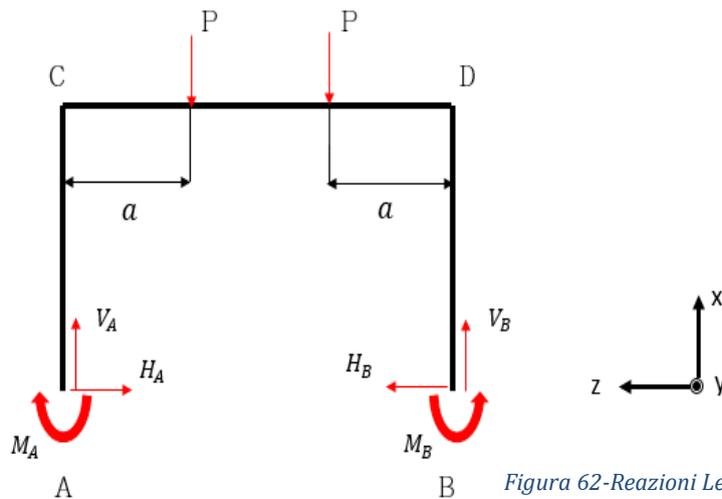


Figura 62-Reazioni Leg-fisso piano xz

- Reazioni vincolari

$$\uparrow V_A + V_B = 2 \cdot P$$

$$\curvearrowright -M_A + M_B - P \cdot a - P \cdot (l - a) + V_B \cdot l = 0$$

Una volta indicate le forze sulla struttura e scritte le reazioni vincolari, si è proseguito andando a svincolare il portale.

In corrispondenza degli estremi D e C infatti sono state introdotte delle cerniere interne.

Le coppie generate dalle forze verticali si ripartiscono nei due elementi di struttura su cui agiscono (piedritto e trave) secondo due contributi  $X_1$  e  $X_2$ . Rappresentiamo quanto appena spiegato:

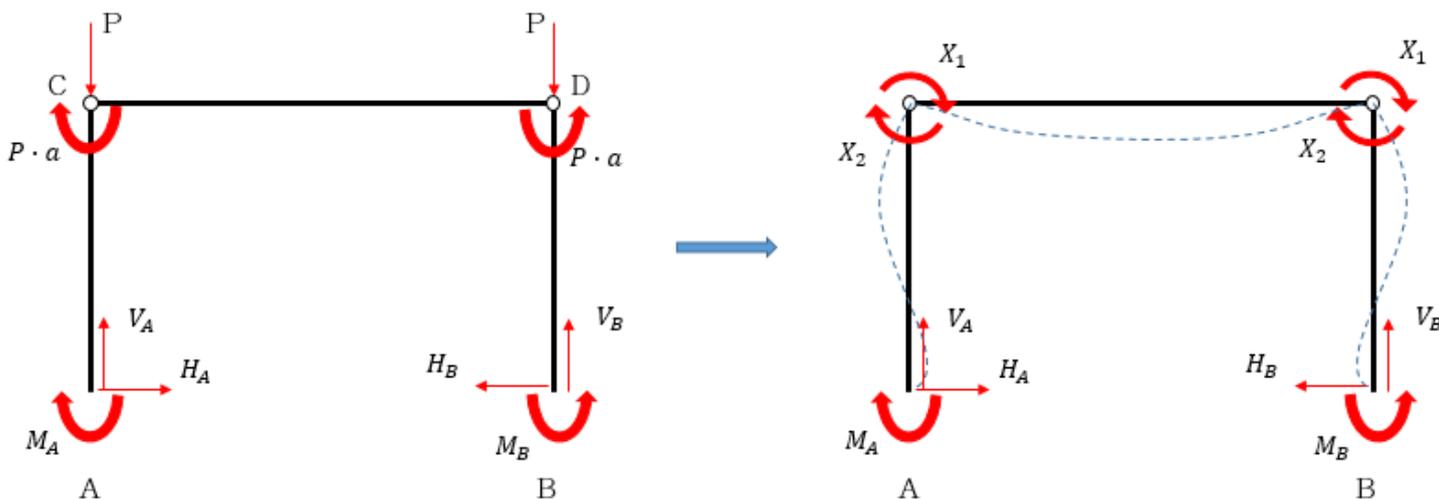
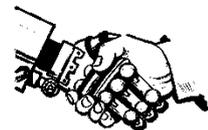


Figura 63-Svincolamento portale

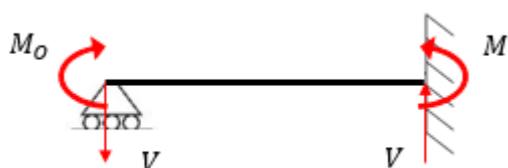


Devono verificarsi le seguenti condizioni:

$$X_1 + X_2 = P \cdot a$$

$$\varphi_{C_{\text{Piedritto}}} = \varphi_{C_{\text{InizioTrave}}}$$

Con lo svincolamento effettuato, i piedritti sono ancora iperstatici ma il loro comportamento lo si può ricondurre al seguente esempio noto:



con:

$$M = \frac{M_0}{2}$$
$$V = \frac{3}{2} \cdot \frac{M_0}{l}$$

Pertanto per il piedritto  $\overline{AC}$  si può scrivere che:

$$M_A = \frac{X_1}{2}$$

$$H = \frac{3}{2} \cdot \frac{X_1}{h}$$

con  $h =$  lunghezza piedritto

Struttando la similitudine con i casi noti, è stato semplice ricavare le espressioni della rotazione per il piedritto e per la traversa.

$$\varphi_{C_{\text{Piedritto}}} = \frac{X_1 \cdot h}{4 \cdot E \cdot J}$$

$$\varphi_{C_{\text{InizioTrave}}} = \frac{P \cdot l}{6 \cdot E \cdot J} \cdot (l - a) - \frac{X_2 \cdot l}{2 \cdot E \cdot J}$$

A questo punto avendo a disposizione tutti gli elementi necessari, sono state ricavate le incognite iniziali. Qui di seguito vengono proposti i passaggi salienti.



$$\left\{ \begin{array}{l} X_1 + X_2 = P \cdot a \\ \frac{X_1 \cdot h}{4 \cdot E \cdot J} = \frac{P \cdot l}{6 \cdot E \cdot J} \cdot (l - a) + \frac{X_2 \cdot l}{2 \cdot E \cdot J} \end{array} \right. \quad \longrightarrow \quad \begin{array}{l} X_1 = 2 \cdot \frac{X_2 \cdot l}{h} + \frac{2}{3} \cdot \frac{P \cdot l}{h} \cdot (l - a) \\ X_2 = \frac{P \cdot a \cdot h}{2 \cdot l + h} - \frac{2}{3} \cdot \frac{P \cdot l}{2 \cdot l + h} \cdot (l - a) \end{array}$$

Sostituendo  $X_2$  in  $X_1$  e svolgendo i calcoli si ottiene

$$X_1 = 2 \cdot \frac{P \cdot a}{(2 \cdot l + h)} \cdot (l - a)$$

Di conseguenza si ricavano tutte le altre incognite:

$$M_A = \frac{X_1}{2} = \frac{P \cdot a}{(2 \cdot l + h)} \cdot (l - a) = 6.78 \text{ Nm}$$

$$H = \frac{3}{2} \cdot \frac{X_1}{h} = \frac{3}{h} \cdot \frac{P \cdot a}{(2 \cdot l + h)} \cdot (l - a) = 98.41 \text{ N}$$

$$V_A = V_B = P$$

Come già anticipato andiamo ad assegnare alle tensioni utilizzate per lo studio nel piano  $xz$ , le effettive tensioni agenti sulla struttura. Avremo quindi:

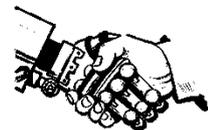
$$P = R_{3x} = R_{pull_{fx}}$$

$$h = l_{r2}$$

$$H = R_{3z}$$

$$M_A = M_{3y}$$

$$M_C = 2 \cdot M_A$$



## Diagrammi degli sforzi Link Fisso

Piano  $yx$

N



Figura 66-Sforzo normale piano  $yx$

T

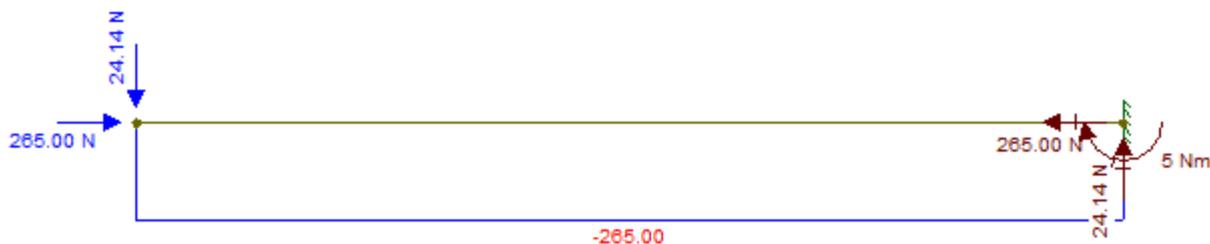


Figura 65-Taglio piano  $yx$

M

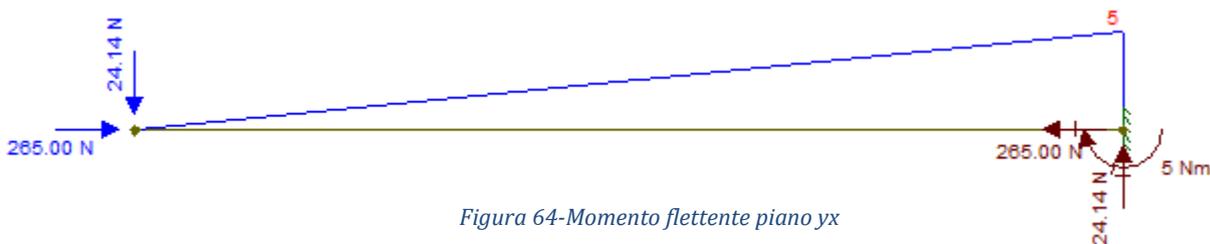
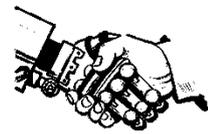


Figura 64-Momento flettente piano  $yx$



Piano xz

N

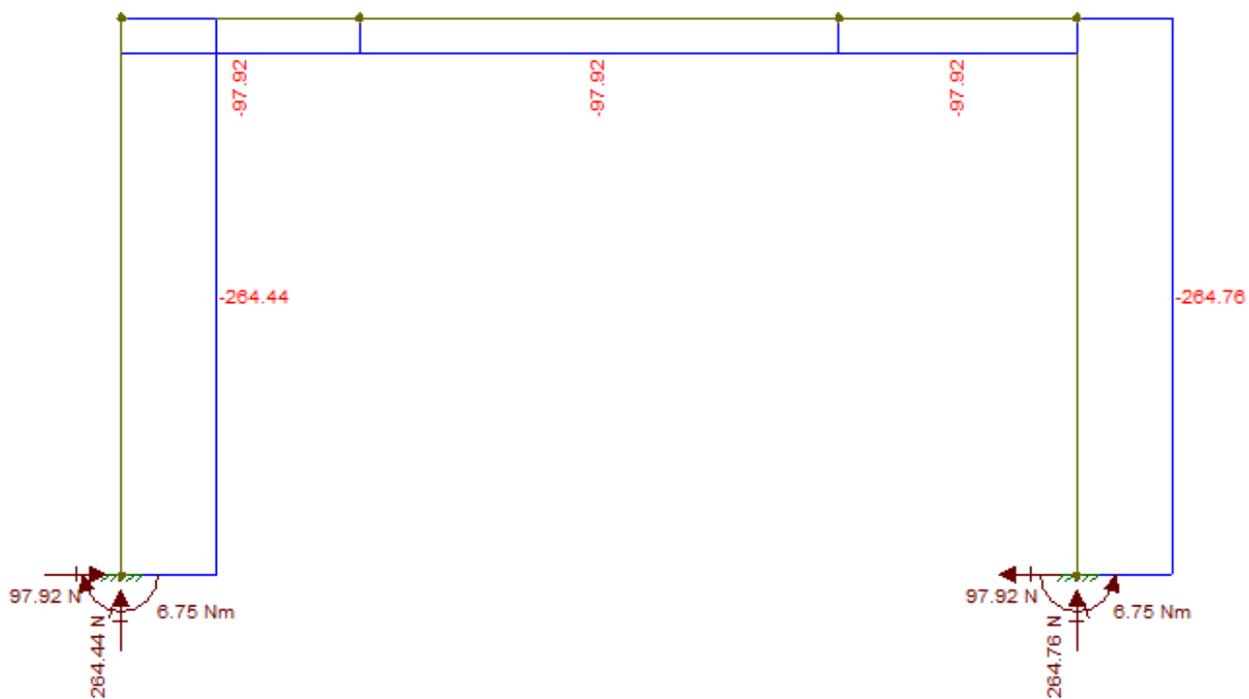
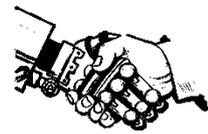


Figura 67-Sforzo normale piano xz



T

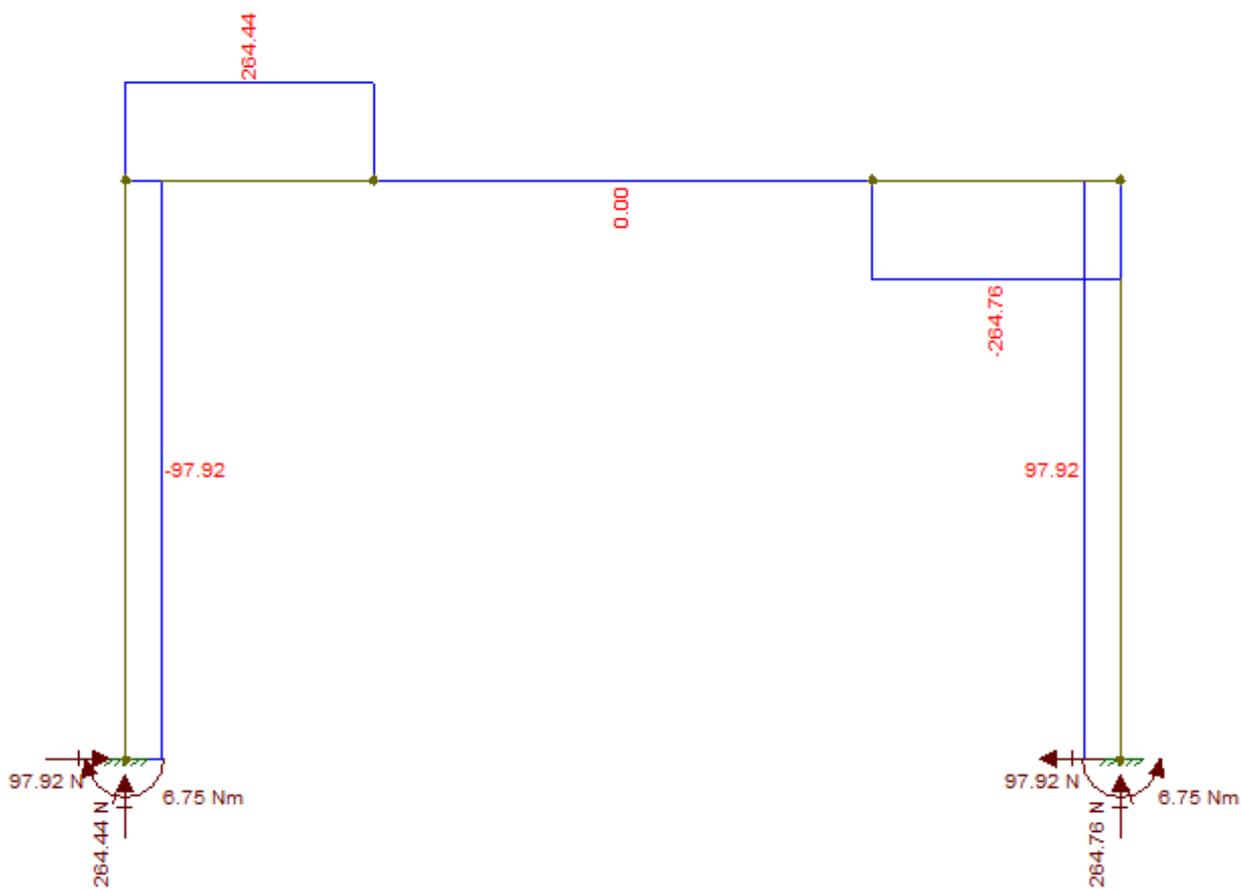


Figura 68-Taglio piano xz



M

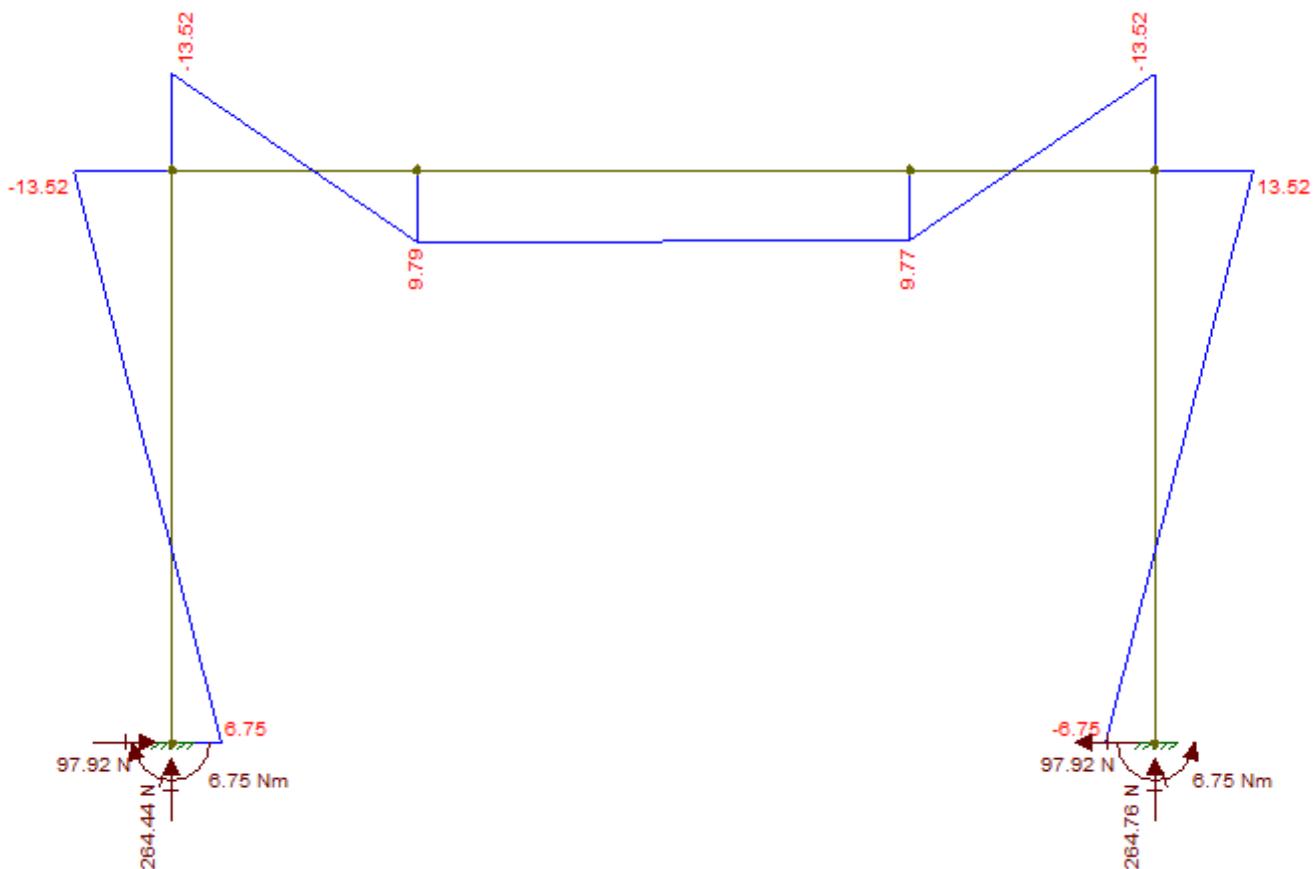
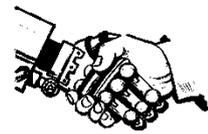


Figura 69-Momento flettente piano xz



Piano yz

N

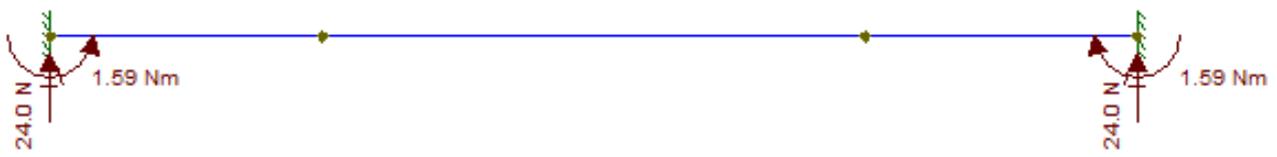


Figura 70-Sforzo normale piano yz

T

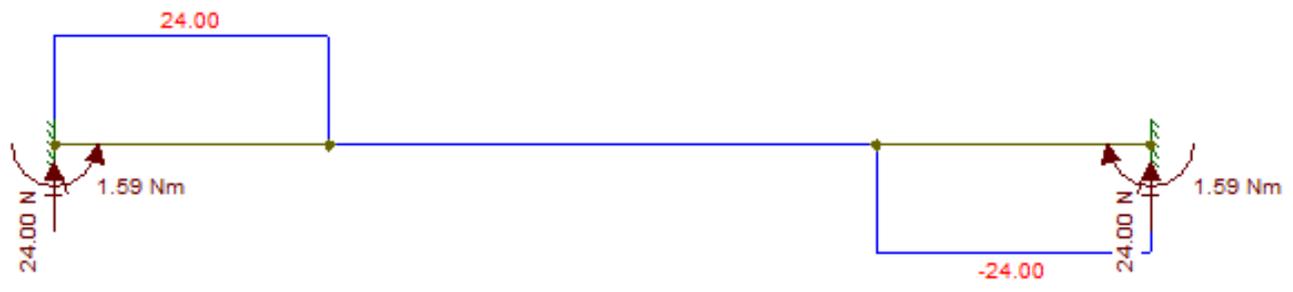


Figura 71-Taglio piano yz

M

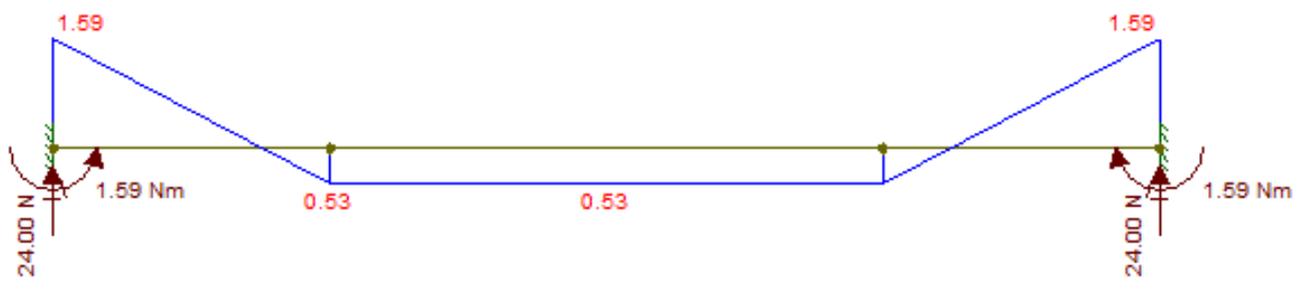
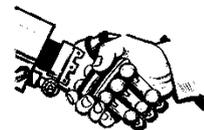


Figura 72-Momento flettente piano yz



### Diagramma di corpo libero puleggia

Anche per il dimensionamento del leg-fisso è stato necessario tracciare il diagramma di corpo libero della puleggia. Analizzando il tutto nella situazione più gravosa, si ottengono le seguenti equazioni:

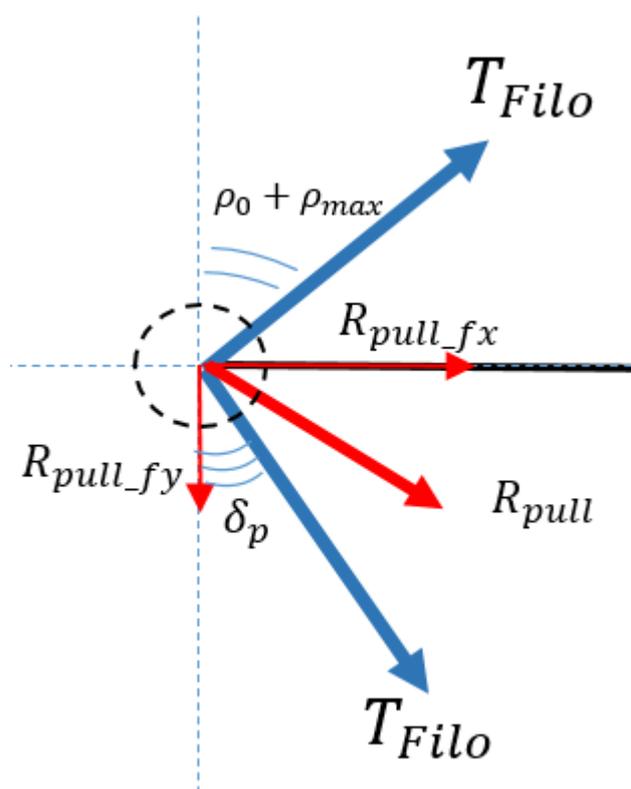


Figura 73-Dcl puleggia Leg Fisso

$$R_{pull\_fy} = T_{Filo} \cdot \cos(\delta_p) - T_{Filo} \cdot \cos(\rho + \rho_0) = 24.14 \text{ N}$$

$$R_{pull\_fx} = T_{Filo} \cdot \sin(\delta_p) + T_{Filo} \cdot \sin(\rho + \rho_0) = 264.6 \text{ N}$$

Tali forze, come abbiamo visto, sono state essenziali per la determinazione del leg fisso.



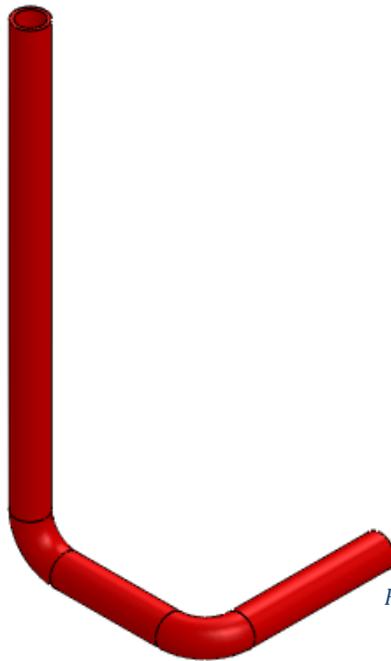
## CAPITOLO V

### *Leg-Link*

*L' ultimo elemento della struttura che resta da analizzare è il leg-link.*

*Tale elemento supporta l' operatore in tutta la sua fase di movimento garantendone equilibrio e stabilità. Sperimentalmente è stato rilevato che in fase di piegamento gli arti inferiori presentano una piccola oscillazione con un massimo pari circa a 10°. Tale rilevazione ha soppresso l' ipotesi iniziale e ne è stato tenuto conto in fase di progettazione.*

*Si connette all' uomo in questo modo: un' estremità al bacino, in corrispondenza dello stesso punto d' attacco degli altri elementi, l' altra estremità alla coscia dell' operatore attraverso un opportuno paracoscia. La tensione in gioco, viene trasmessa a tale elemento tramite il filo, il quale è adeguatamente fissato al paracoscia.*



*Figura 74-Leg Link*

*Nel prossimo paragrafo saranno descritte le considerazioni adottate e i vari step per il dimensionamento del leg link.*



## Approccio ingegneristico Leg-Link

La metodologia di dimensionamento è la stessa adottata per gli altri due elementi, dunque il leg link è stato analizzato nelle tre viste dello spazio e sono stati assegnati i vincoli agli estremi per rendere semplice il modello.

In ogni vista dello spazio, la struttura risulta isostatica e il calcolo delle reazioni vincolari non si è mostrato particolarmente complicato.

Riportiamo dunque qui di seguito quanto descritto.

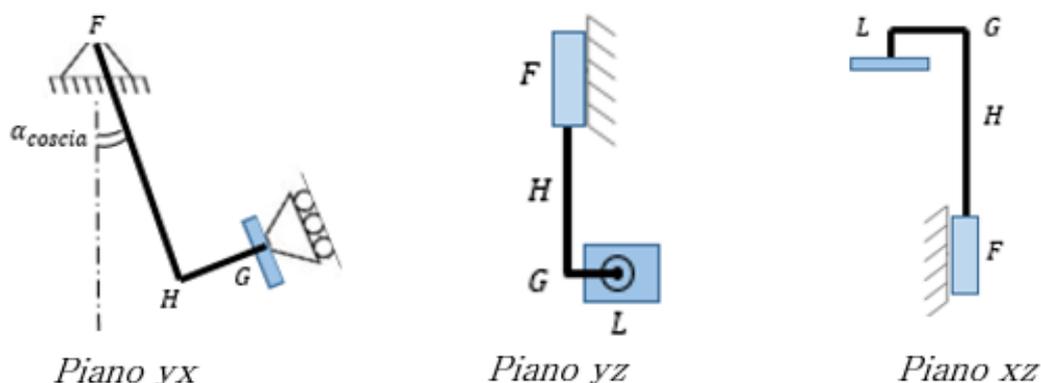


Figura 75-Leg-Link: viste nello spazio

I rettangoli raffigurati in blu corrispondono al giunto d' attacco del leg link (rettangolo in prossimità dell' incastro) e al paracoscia (rettangolo restante).

Nel prossimo paragrafo, come precedentemente fatto saranno illustrati i calcoli relativi ad ogni piano e alcuni utili passaggi geometrici preliminari.

### Geometria preliminare

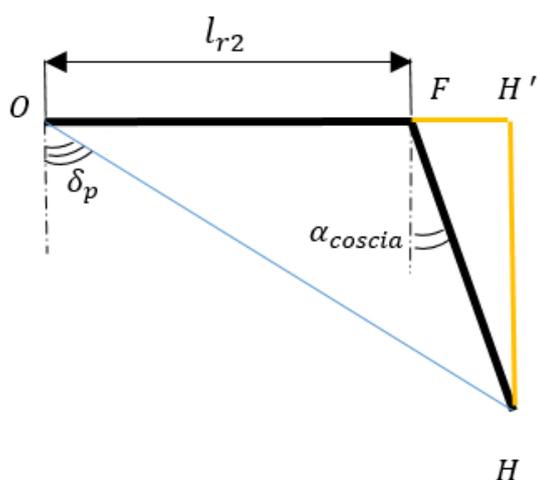


Figura 76-Geometria preliminare Leg-Link

Lo schema riportato qui di fianco, rappresenta la condizione del leg link quando l' uomo effettua il suo piegamento massimo. Il filo (indicato in blu) aumenta l' angolo con la verticale denominato  $\delta_p$ . Attraverso semplici calcoli di trigonometria e tracciando l' altezza  $\overline{HH'}$  del triangolo  $OFH$  è stato possibile determinarlo. Sappiamo che:

$$\overline{FH} = dp = 0.6 \cdot (0.530 - 0.285) \cdot h_{uomo} \quad (\text{da dati antropometrici})$$

$$\overline{HH'} = dp \cdot \cos(\alpha_{coscia})$$

$$\overline{FH'} = dp \cdot \sin(\alpha_{coscia})$$



Applicando la trigonometria si ha:

$$\delta_p = \tan^{-1} \left( \frac{\overline{FH'} + \overline{OF}}{\overline{HH'}} \right) = \tan^{-1} \left( \frac{l_{r2} + dp \cdot \sin \alpha_{coscia}}{dp \cdot \cos \alpha_{coscia}} \right) = 43.47^\circ$$

Definita la geometria è stato possibile risolvere i calcoli che seguono.

### Calcoli strutturali Leg-Link

Piano yx

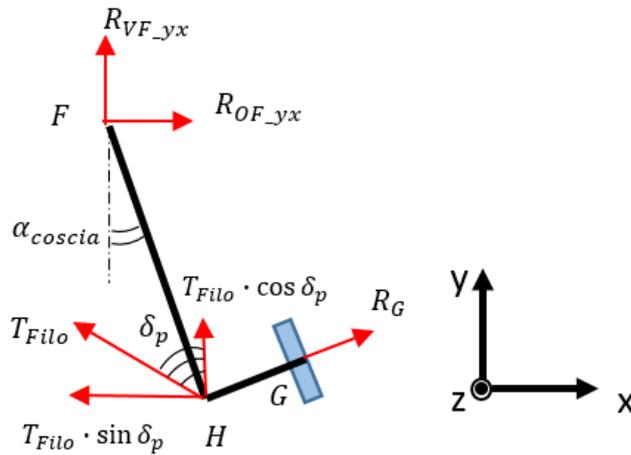
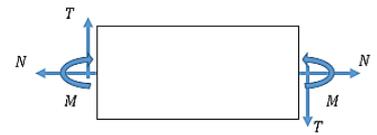


Figura 77-Reazioni Leg-Link piano yx

Con  $\overline{HG} = \overline{FH}/3$

- Reazioni vincolari

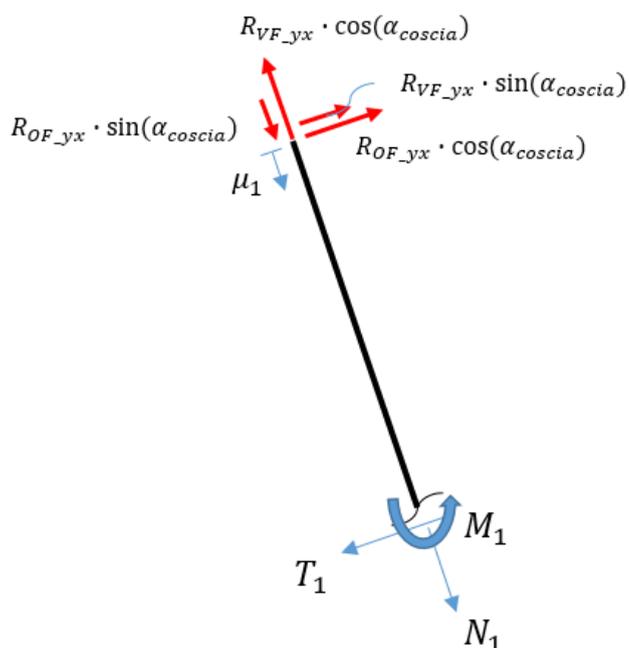
$$R_{VF_{yx}} = -T_{Filo} \cdot \cos \delta_p - R_G \cdot \sin \alpha_{coscia}$$

$$R_{OF_{yx}} = +T_{Filo} \cdot \sin \delta_p - R_G \cdot \cos \alpha_{coscia}$$

$$R_G = \frac{-T_{Filo} \cdot \cos \delta_p \cdot dp \cdot \sin \alpha_{coscia} + T_{Filo} \cdot \sin \delta_p \cdot dp \cdot \cos \alpha_{coscia}}{dp}$$



## Caratteristiche di sollecitazione piano $yx$

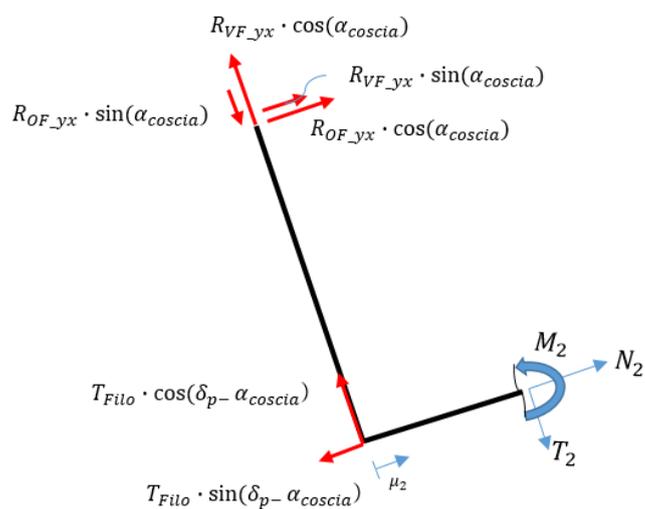


$$0 \leq \mu_1 \leq dp$$

$$N_1 = -R_{OF_{yx}} \cdot \sin \alpha_{coscia} + R_{VF_{yx}} \cdot \cos \alpha_{coscia}$$

$$T_1 = +R_{OF_{yx}} \cdot \cos \alpha_{coscia} + R_{VF_{yx}} \cdot \sin \alpha_{coscia}$$

$$M_1 = +R_{OF_{yx}} \cdot \cos \alpha_{coscia} \cdot \mu_1 + R_{VF_{yx}} \cdot \sin \alpha_{coscia} \cdot \mu_1$$



$$0 \leq \mu_2 \leq \overline{HG}$$

$$N_2 = -R_{OF_{yx}} \cdot \cos \alpha_{coscia} - R_{VF_{yx}} \cdot \sin \alpha_{coscia} + T_{Filo} \cdot \sin(\delta_p - \alpha_{coscia})$$

$$T_2 = -R_{OF_{yx}} \cdot \sin \alpha_{coscia} + R_{VF_{yx}} \cdot \cos \alpha_{coscia} + T_{Filo} \cos(\delta_p - \alpha_{coscia})$$

$$M_2 = +R_{OF_{yx}} \cdot \cos \alpha_{coscia} \cdot dp + R_{VF_{yx}} \cdot \sin \alpha_{coscia} \cdot dp - R_{OF_{yx}} \cdot \sin \alpha_{coscia} \cdot \mu_2 + R_{VF_{yx}} \cdot \cos \alpha_{coscia} \cdot \mu_2 + T_{Filo} \cos(\delta_p - \alpha_{coscia}) \cdot \mu_2$$



Piano xz

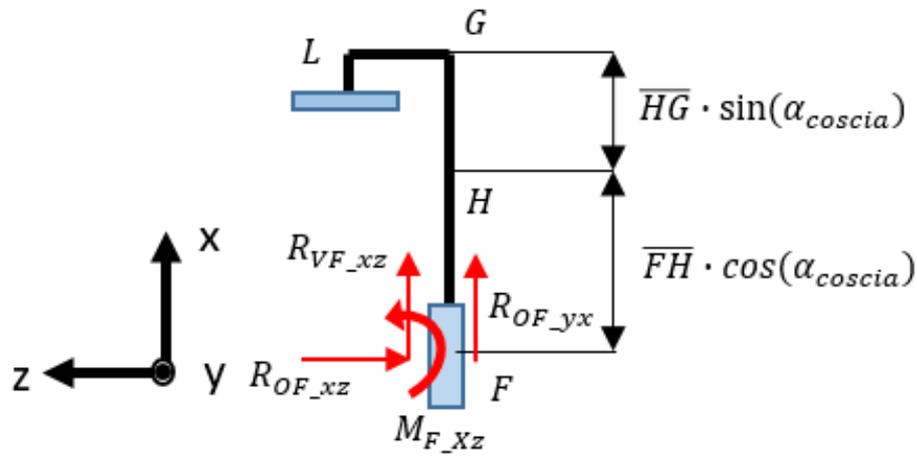


Figura 78-Reazioni Leg-Link piano xz

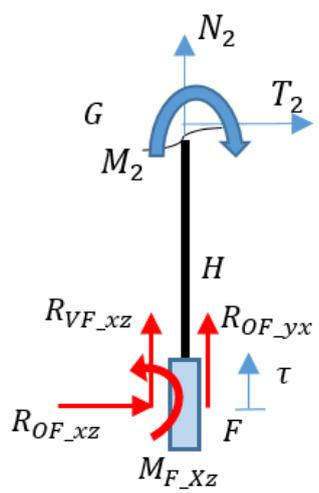
- Reazioni vincolari

$$R_{OF_{xz}} = 0$$

$$R_{VF_{xz}} = -R_{OF_{yx}} - R_G \cdot \cos \alpha_{coscia}$$

$$M_{F_{xz}} = R_G \cdot \cos \alpha_{coscia} \cdot \overline{LG}$$

Caratteristiche di sollecitazione piano xz

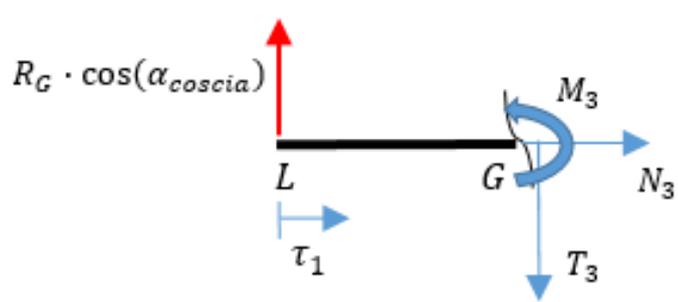


$$0 \leq \tau \leq \overline{FH} \cdot \cos(\alpha_{coscia}) + \overline{HG} \cdot \sin(\alpha_{coscia})$$

$$N_2 = -R_{VF_{xz}} - R_{OF_{yx}}$$

$$T_2 = -R_{OF_{xz}}$$

$$M_2 = R_{OF_{xz}} \cdot \tau + M_{F_{xz}}$$



$$0 \leq \tau_1 \leq \overline{LG}$$

$$N_3 = 0$$

$$T_3 = 0$$

$$M_3 = R_G \cdot \cos(\alpha_{coscia}) \cdot \tau_1$$

Piano yz

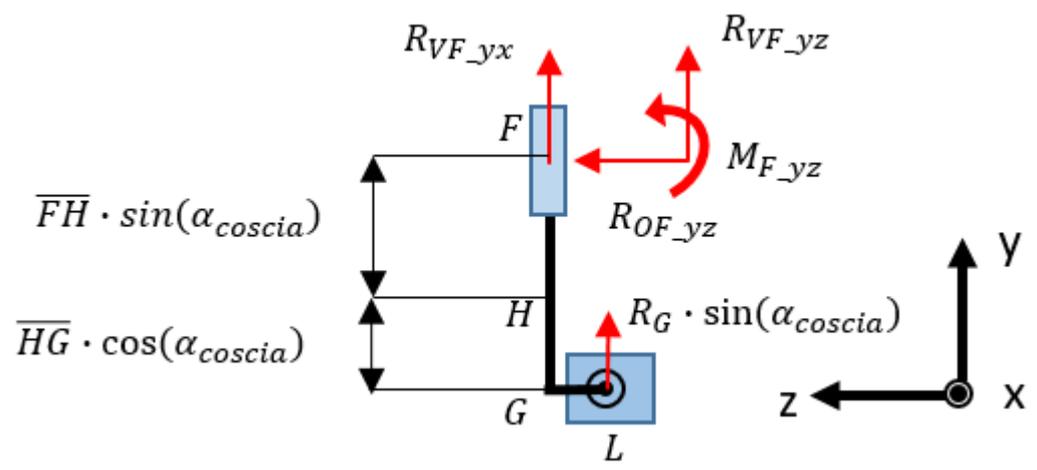


Figura 79-Reazioni Leg-Link piano yz

Considerando  $\overline{LG} = \overline{HG}$ .

- Reazioni vincolari

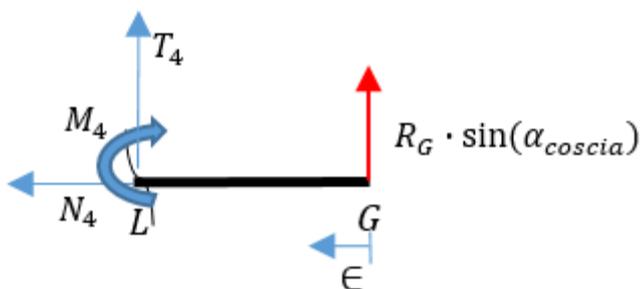
$$R_{OF\_yz} = 0$$

$$R_{VF\_yz} = -R_{VF\_yx} - R_G \cdot \sin(\alpha_{coscia})$$

$$M_{F\_yz} = -R_G \cdot \sin(\alpha_{coscia}) \cdot \overline{LG}$$



Caratteristiche di sollecitazione piano yz

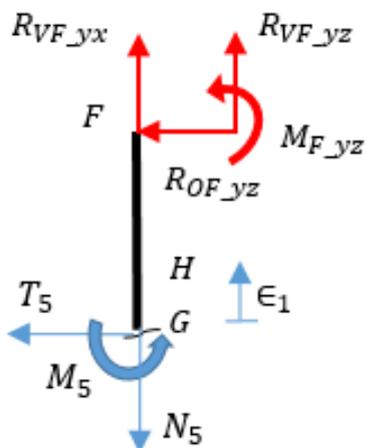


$$0 \leq \epsilon \leq \overline{LG}$$

$$N_4 = 0$$

$$T_4 = -R_G \cdot \sin(\alpha_{coscia})$$

$$M_4 = R_G \cdot \sin(\alpha_{coscia}) \cdot \epsilon$$



$$0 \leq \epsilon_1 \leq \overline{FH} \cdot \sin(\alpha_{coscia}) + \overline{HG} \cdot \cos(\alpha_{coscia})$$

$$N_5 = R_{VF\_yx} + R_{VF\_yz}$$

$$T_5 = -R_{OF\_yz}$$

$$M_5 = M_{F\_yz}$$



## Diagrammi degli sforzi Leg-Link

Piano yx

N

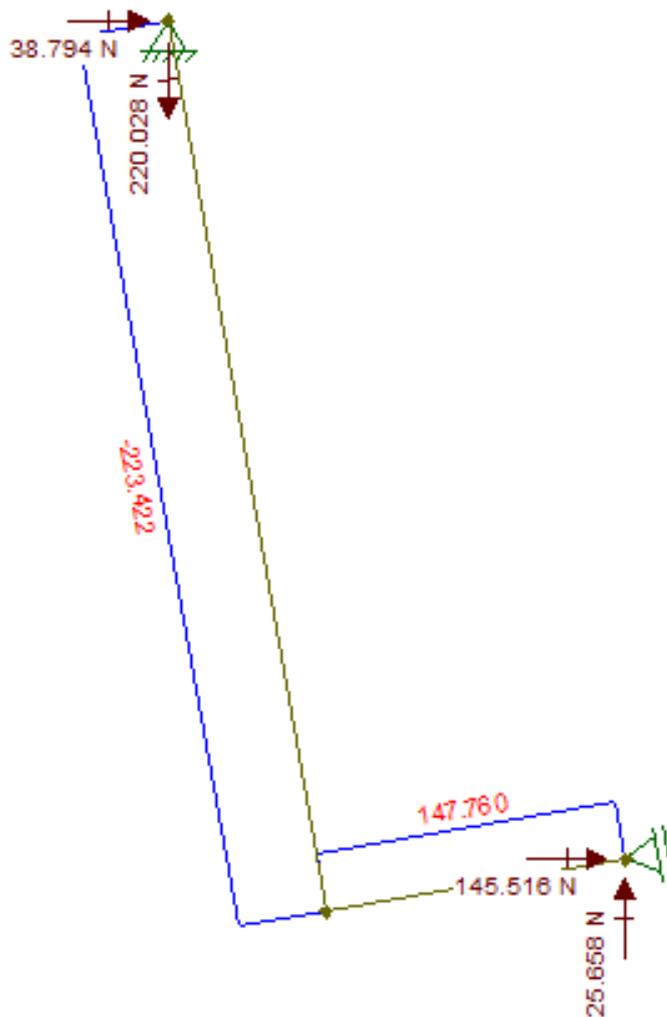


Figura 80-Sforzo normale piano yx



T

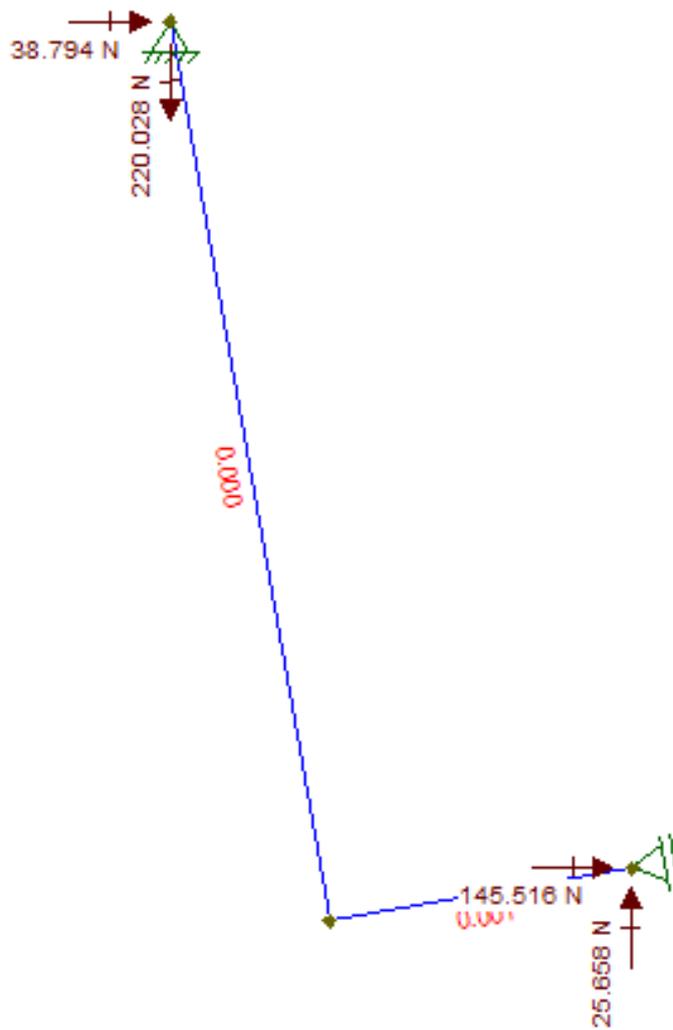


Figura 81-Taglio piano yx



M

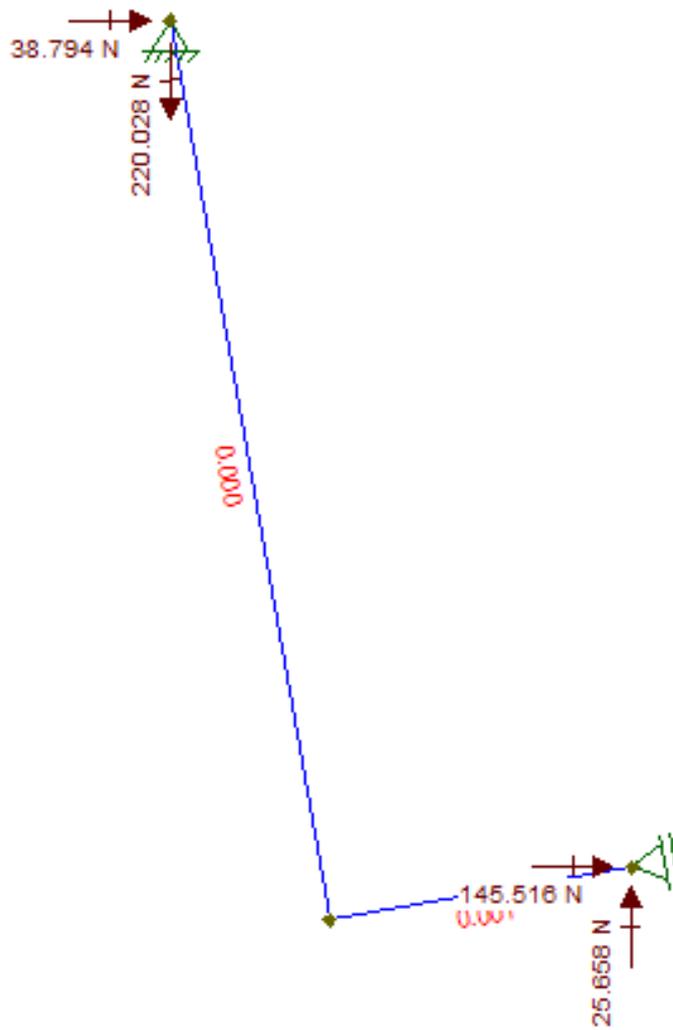


Figura 82-Momento flettente piano yx



Piano xz

N

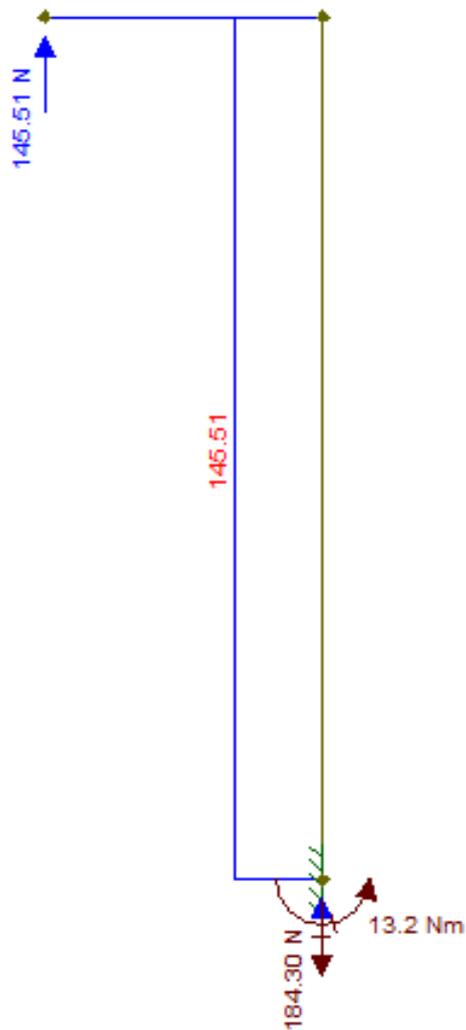


Figura 83-Sforzo normale piano xz



T

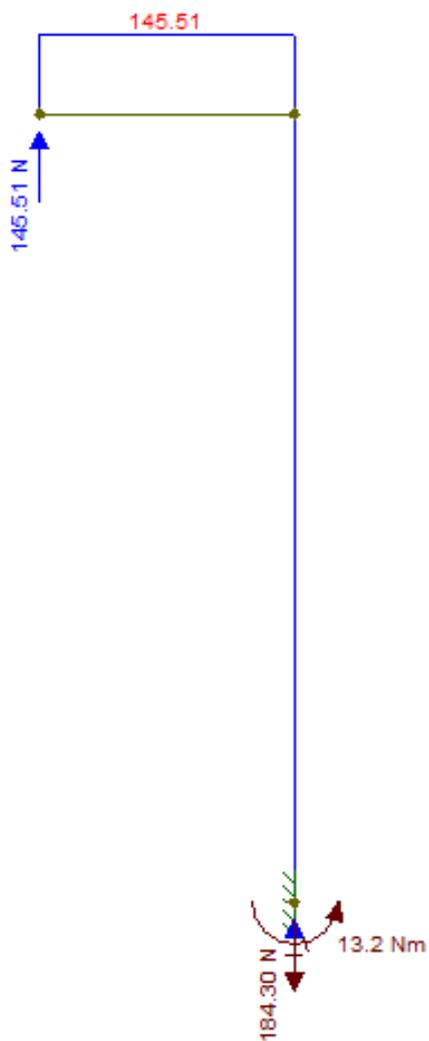


Figura 84-Taglio piano xz



M

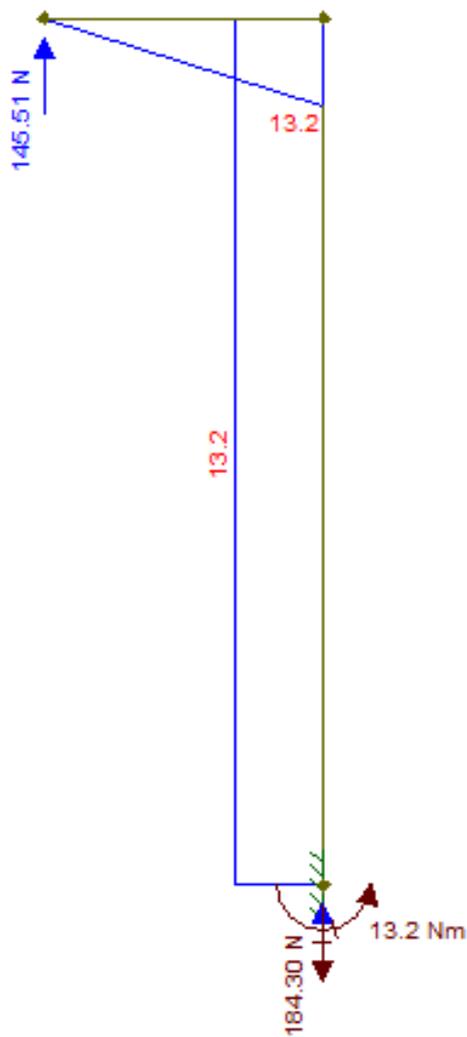


Figura 85-Momento flettente piano xz



Piano yz

N

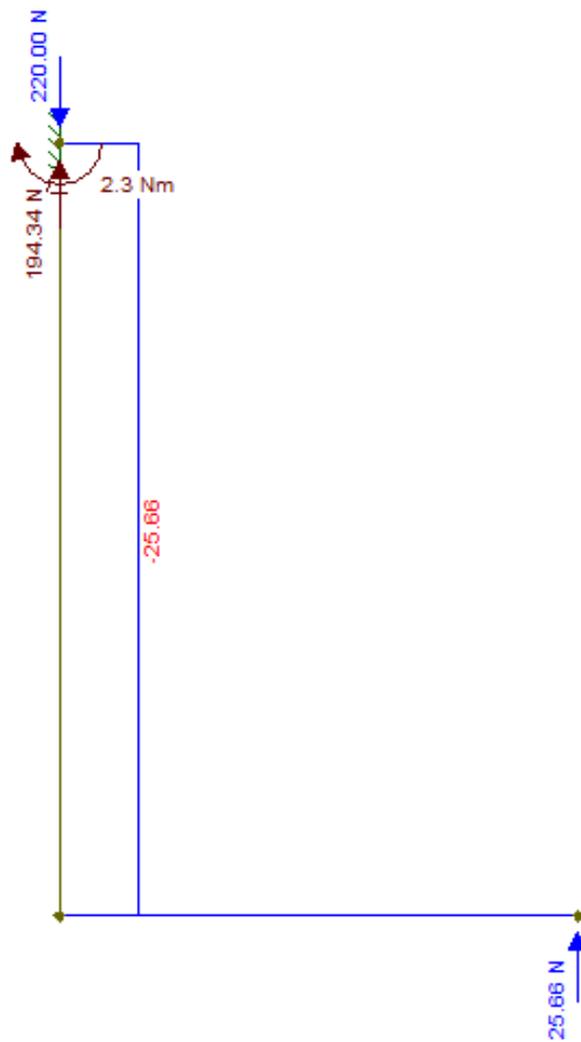


Figura 86-Sforzo normale piano yz



T

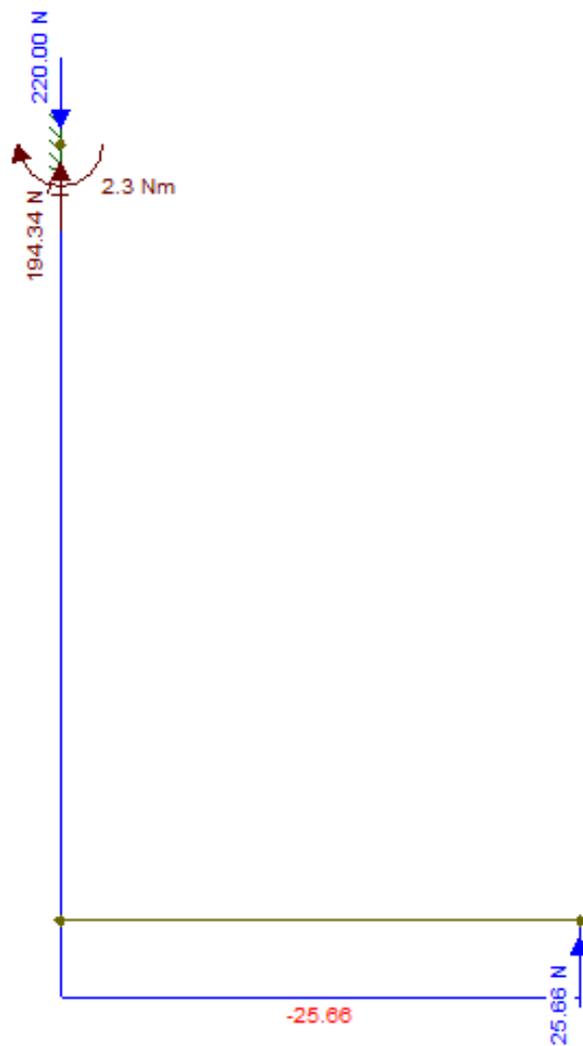
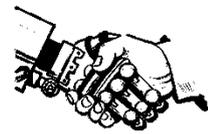


Figura 87-Taglio piano yz



M

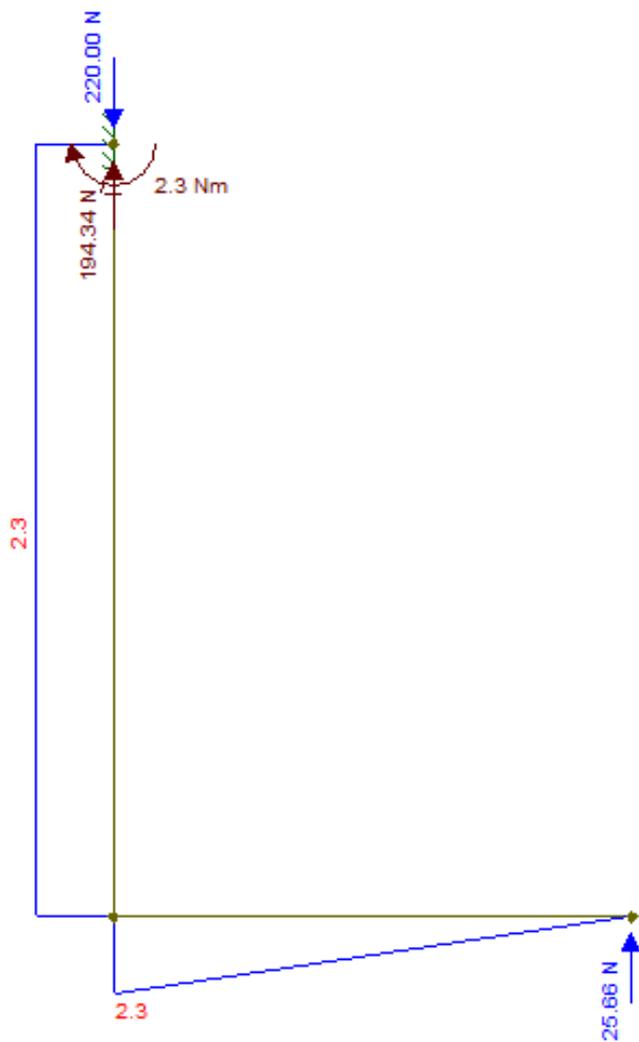


Figura 88-Momento flettente piano yz



## CAPITOLO VI

### *Procedura di dimensionamento*

Nel corso di questo capitolo si espliciteranno i passaggi effettuati per ricavare le dimensioni finali di tutti e tre gli elementi strutturali fin' ora analizzati.

La consuetudine nell' ambito della progettazione, vuole che il primo passo per la determinazione delle dimensioni di uno specifico componente sia la scelta del materiale.

Le specifiche di progetto, nonché l' ingombro ed il peso della struttura che l' operatore dovrà sopportare per un' intera giornata lavorativa, dipendono fortemente dalle proprietà meccaniche del materiale.

Tuttavia, trattandosi di un prototipo e considerando gli aspetti economici e la reperibilità commerciale, si è optato per la lega di alluminio 6060 T6 scelta dal CATALOGO ALQ.

Si riassumono qui di seguito i valori della tensione di snervamento e densità della lega:

$$R_{p0.2} = 200 \text{ Mpa}$$

$$\rho = 2700 \text{ Kg/m}^3$$

Ammettendo un coefficiente di sicurezza  $C.S = 1.6$ , e conoscendo il valore della tensione di snervamento del materiale, è stata ricavata la tensione ammissibile, valore che rientra nel calcolo per il dimensionamento minimo.

In formula:

$$\sigma_{amm} = \frac{R_{p0.2}}{C.S.}$$

Dalle caratteristiche di sollecitazione ricavate precedentemente, è stato individuato un momento flettente ideale massimo in modo che si tenesse conto di tutti gli sforzi presenti nell' elemento in esame.

Nel caso in cui il tratto analizzato fosse sollecitato a flessione in due differenti direzioni dello spazio, il calcolo del momento è stato così impostato:

$$M_{fid} = \sqrt{M_{f1}^2 + M_{f2}^2}$$

Nel caso in cui oltre alla flessione il tratto avesse subito sollecitazioni torsionali, il momento flettente ideale è stato determinato tramite la relazione di *Von Mises*:

$$M_{fid} = \sqrt{M_f^2 + 0.75 \cdot M_t^2}$$

A questo punto risultava necessario individuare la sezione più opportuna da assegnare alla struttura. Si è optato per una sezione circolare cava.



Il ragionamento che ha portato alla definizione delle dimensioni finali è stato il seguente:

1. Calcolo del diametro minimo e del modulo di resistenza a flessione considerando la sezione piena;
2. Scelta da catalogo (a tentativi) dei diametri interno ed esterno disponibili in commercio per la lega di alluminio considerata;
3. Calcolo del modulo di resistenza a flessione con i diametri scelti da catalogo;
4. Confronto tra i moduli di resistenza a flessione;
5. Determinazione delle dimensioni definitive;

Seguendo lo stesso ordine, si riportano le formule utilizzate:

$$1. d_{min} = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot M_{fid}}{\pi \cdot \sigma_{amm}}}; W_{f_{min_{piena}}} = \frac{M_{fid}}{\sigma_{amm}}$$

$$2. d_{ext}; d_{int} \text{ (di primo tentativo)}$$

$$3. W_{f_{min_{cava}}} = \frac{\pi \cdot (d_{ext}^4 - d_{int}^4)}{32 \cdot d_{ext}}$$

$$4. W_{f_{min_{cava}}} > W_{f_{min_{piena}}}$$

$$5. d_{ext_{def}}; d_{int_{def}}$$

È necessario specificare che il passaggio al punto 5 si è verificato solo dopo l' esito positivo del confronto espresso nel punto 4. In tutti gli altri casi, è stato inevitabile ricominciare dal punto 2.

I calcoli strutturali sono stati poi completati con la valutazione della tensione equivalente utilizzando l' ipotesi di Von Mises:

$$\sigma_{id} = \sqrt{(\sigma_f + \sigma_N)^2 + 3\tau^2}$$

dove:

$\sigma_f$  → tensione relativa al momento flettente.

$\sigma_N$  → tensione relativa allo sforzo normale.

$\tau$  → tensione tangenziale.

È stato possibile inoltre, valutare il coefficiente di sicurezza effettivo e valutare se fosse maggiore di quanto ipotizzato. In formule :

$$CS_{eff} = \frac{\sigma_{amm}}{\sigma_{id}}$$



## Risultati ottenuti per tutti gli elementi

In questo paragrafo si riassumono i principali risultati ottenuti in termini di sollecitazioni e dimensioni finali.

### Back Frame

Analizzando i diagrammi di sollecitazione, si nota che la zona maggiormente sottoposte a stress è quella relativa al tratto  $l_1$  che risulta essere sollecitato sia a flessione che a torsione (nel piano  $yz$ ). Per rendere più chiara la procedura attuata, utilizziamo il caso del back frame come esempio. In formule:

Calcolo delle dimensioni minimi relative alla sezione piena

$$M_{fid} = \sqrt{M_1^2 + 0.75 \cdot M_{2_zx}^2 + M_y^2} = 44.94 \text{ Nm} ; d_{min} = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot M_{fid}}{\pi \cdot \sigma_{amm}}} = 15.41 \text{ mm} ; W_{f_{minpiena}} = \frac{M_{fid}}{\sigma_{amm}} = 359.55 \text{ mm}^3$$

Scelta da catalogo diametro esterno ed interno e calcolo del modulo di flessione minimo

$$d_{ext} = 17 \text{ mm} ; d_{int} = 11 \text{ mm} \quad W_{f_{mincava}} = \frac{\pi \cdot (d_{ext}^4 - d_{int}^4)}{32 \cdot d_{ext}}$$

Confronto tra modulo a flessione sezione piena e modulo a flessione sezione cava

$$W_{f_{mincava}} > W_{f_{minpiena}} = 397.78 \text{ mm}^3 > 359.55 \text{ mm}^3$$

Già al primo tentativo la condizione risulta rispettata. Tuttavia, adottando successivamente il metodo degli elementi finiti, si è ritenuto necessario scegliere altri diametri,

$$d_{ext_{def}} = 20 \text{ mm} ; d_{int_{def}} = 8 \text{ mm}$$

$$W_{fcava} > W_{f_{minpiena}} = 765.29 \text{ mm}^3 > 359.55 \text{ mm}^3$$

Per determinare analiticamente il punto più sollecitato della struttura, come già detto, è stata utilizzata la relazione di Von Mises.

Andando a calcolare tale tensione in corrispondenza dell' angolo tra il tratto  $l_1$  e la lunghezza  $a + \frac{a}{2}$ , si è ottenuta una tensione ideale pari a:

$$\sigma_{id} = 58.03 \text{ MPa}$$

Di conseguenza rapportando tale valore con la  $\sigma_{amm}$ , si ottiene :

$$CS_{eff} = 2.15 > 1$$



### Link Fisso

Adottando la stessa procedura vista per il back frame, individuiamo le zone maggiormente sottoposte a stress.

Partendo dal piedritto, il calcolo del momento flettente tiene conto della torsione che subisce lungo l'asse x, pertanto presenta tale espressione:

$$M_{fid} = \sqrt{M_f^2 + 0.75 \cdot M_t^2} = 8.53 \text{ Nm}$$

essendo :

$$M_f^2 = M_{1_zf}^2 + M_A^2$$

$$M_t = M_{2x}$$

A flessione torsione risulta anche sollecitato l'angolo tra l'inizio della traversa e la fine del piedritto. Si avrà:

$$M_{fid} = \sqrt{M_f^2 + 0.75 \cdot M_t^2} = 13.63 \text{ Nm}$$

con:

$$M_f^2 = M_C^2$$

$$M_t = M_{2x}$$

La traversa risulta il tratto meno sollecitato, sottoposto soltanto a flessione e con un momento ideale pari a :

$$M_{fid} = \sqrt{M_A^2 + M_{1x}^2} = 6.97 \text{ Nm}$$

Pertanto, la zona critica risulta quella in corrispondenza dell'angolo sopracitato. Sfruttando quindi il momento ideale massimo in tale zona, il diametro minimo è :

$$d_{min} = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot M_{fid}}{\pi \cdot \sigma_{amm}}} = 11.06 \text{ mm}$$



Di conseguenza e in seguito ai tentativi effettuati sul catalogo per la scelta dei diametri, si è optato per la seguente coppia di valori:

$$d_{ext_{def}} = 15 \text{ mm} ; d_{int_{def}} = 12 \text{ mm}$$

$$\Rightarrow W_{fcava} > W_{f_{min_{piena}}} = 195.62 \text{ mm}^3 > 106.40 \text{ mm}^3$$

Nella stesso angolo è stata successivamente determinata la tensione ideale massima e confrontandola con quella ammissibile, si è determinato il coefficiente di sicurezza effettivo. Di seguito i risultati :

$$\sigma_{id} = 74 \text{ MPa}$$

$$CS_{eff} = 1.69 > 1$$

### Leg-Link

Partendo sempre dal diagramma degli sforzi, l' angolo tra il tratto di lunghezza  $\overline{HG}$  e il tratto  $\overline{LG}$  è quello che presenta maggior sollecitazioni.

È sottoposto a torsione nel piano yz e flessione nel piano xz, pertanto il momento flettente di flessotorsione è pari a :

$$M_{fid} = \sqrt{M_f^2 + 0.75 \cdot M_t^2} = 13.34 \text{ Nm}$$

Considerando rispettivamente  $M_f = M_2$  per la flessione, e  $M_t = M_4$  per la torsione. Il diametro minimo ottenuto è pari a :

$$d_{min} = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot M_{fid}}{\pi \cdot \sigma_{amm}}} = 10.28 \text{ mm}$$

Dal catalogo sono stati poi scelti i seguenti diametri:

$$d_{ext_{def}} = 14 \text{ mm} ; d_{int_{def}} = 11 \text{ mm}$$

$$\Rightarrow W_{fcava} > W_{f_{min_{piena}}} = 199.27 \text{ mm}^3 > 106.75 \text{ mm}^3$$

Nella stesso angolo è stata successivamente determinata la tensione ideale massima e confrontandola con quella ammissibile, si è determinato il coefficiente di sicurezza effettivo. Di seguito i risultati :

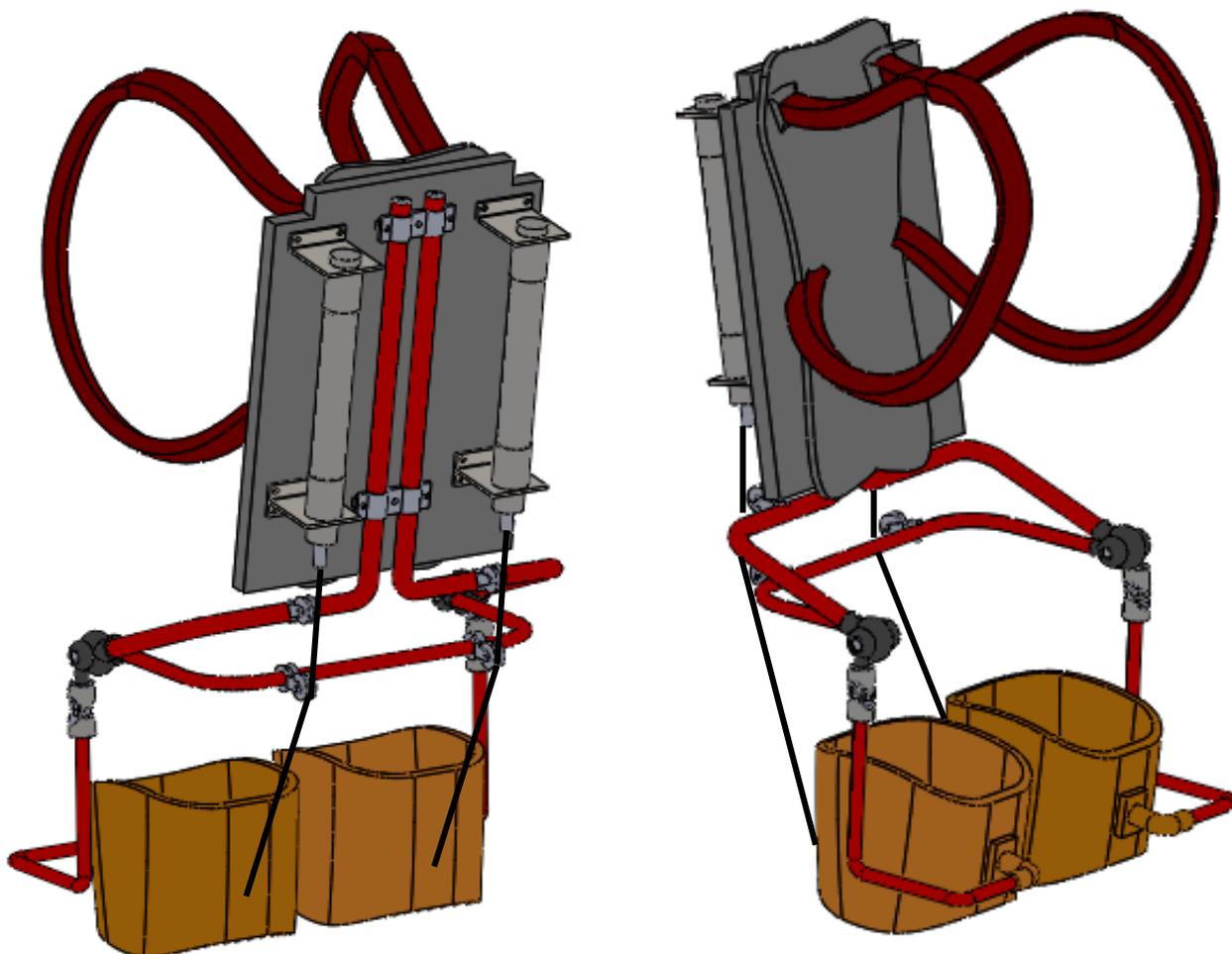
$$\sigma_{id} = 67.23 \text{ MPa}$$

$$CS_{eff} = 1.86 > 1$$



## *Concept definitivo dell' esoscheletro.*

*Nel seguente paragrafo verrà descritta e illustrata l'idea di prototipo finale.*

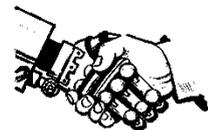


*Figura 89-Concept finale del dispositivo*

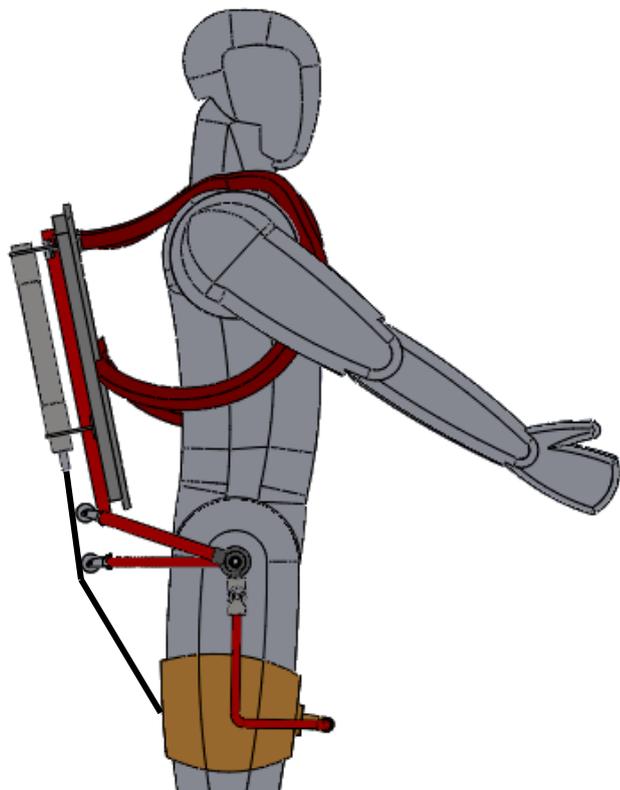
*Le immagini qui sopra riportate rappresentano graficamente il complessivo finale dell' esoscheletro.*

*Come anticipato nei capitoli precedenti, la vestibilità è pari a quella di un semplice zaino da trekking con l'aggiunta dei due paracoscia per garantire un miglior sostegno nelle due fasi di movimento. Tutti i componenti sono stati realizzati tramite il software Solidworks eccetto per il modello dell'uomo che è stato scaricato dal web su GrabCad.com.*

*Analizziamo ora le caratteristiche principali del dispositivo.*



Il modello di esoscheletro segue bene i movimenti eseguiti dall' operatore. Le immagini qui di seguito mostrano il comportamento nelle due posizioni analizzate.



Posizione iniziale

Figura 90-Operatore+Exo in Posizione 0

Posizione Finale

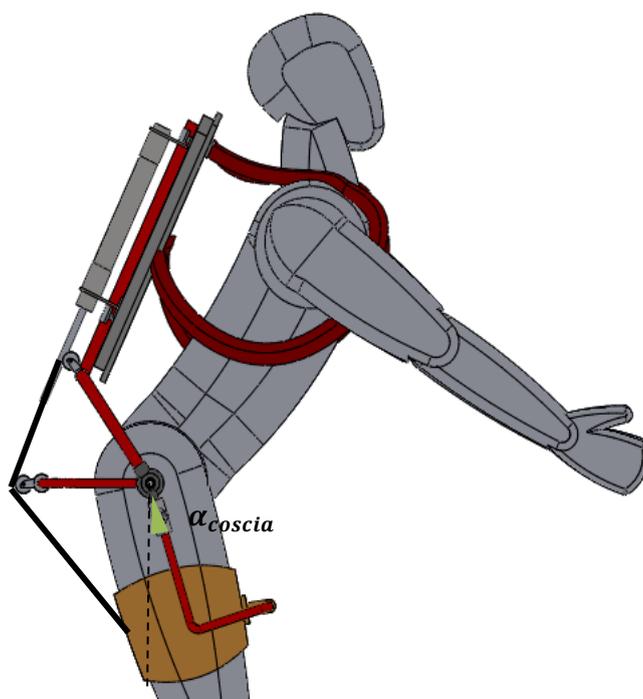


Figura 91-Operatore+Exo in Posizione 1



Imponendo sul programma il movimento di flessione e combinando adeguatamente gli accoppiamenti, si notano due aspetti importanti: i cilindri restano all' interno delle camere in posizione iniziale e fuoriescono in posizione finale, le gambe si inclinano e il bacino indietreggia quando l' operatore raggiunge l' angolo massimo di flessione. Si può affermare pertanto, che il modello 3D approssima bene il comportamento reale eccetto per i problemi riscontrati che affronteremo nel prossimo capitolo.

Le forze radiali esercitate dal back frame e dal leg link, vengono assorbite da due cuscinetti opportunamente scelti che alloggiato all' interno dei rispettivi giunti e ruotano sul perno correttamente dimensionato.

Per quanto riguarda gli ingombri, si è cercato di progettare il perno e di conseguenza i giunti dei tre elementi nell' ottica di non oltrepassare i 65 mm di estensione laterale.

In merito invece ai gradi di libertà permessi, oltre a garantire la flessione nel piano sagittale, vengono concessi i movimenti di abduzione e adduzione della gamba. Il leg Link infatti è connesso al dispositivo attraverso due giunti. Il primo (indicato in nero in figura) permette la rotazione e la normale deambulazione dell' operatore, il secondo invece garantisce la flessione laterale degli arti inferiori. In figura sono mostrate le immagini di quanto appena descritto.

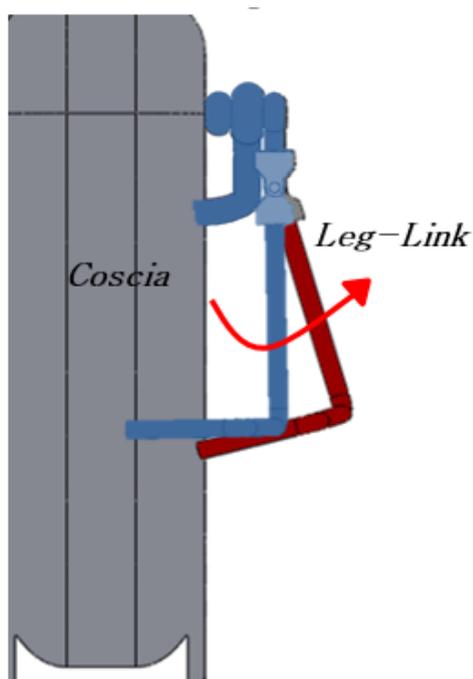


Figura 92-Movimento di abduzione/adduzione concesso dal Leg-Link

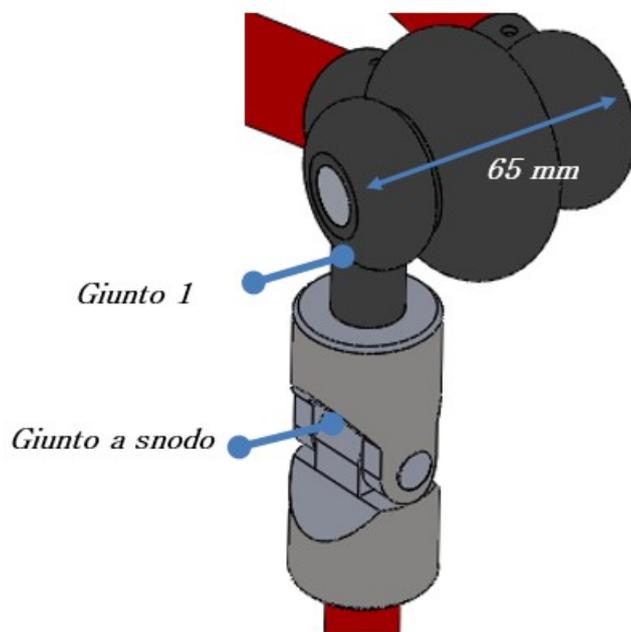
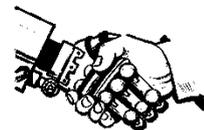


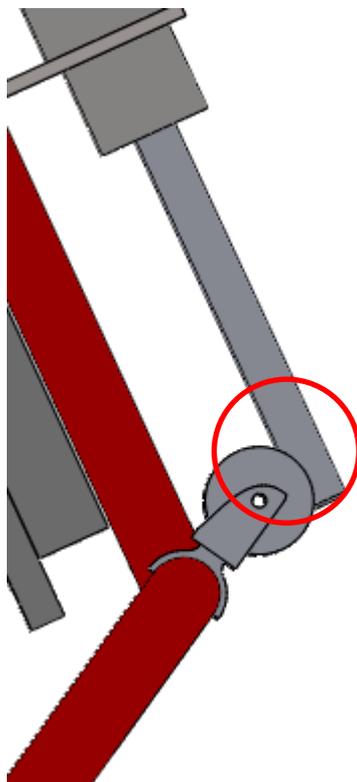
Figura 93-Ingombro laterale+Giunti Leg-Link



## CAPITOLO VII

### *Problematiche riscontrate e possibili soluzioni*

*In fase di progettazione si conosceva già quale sarebbe stata la difficoltà legata alla scelta degli attuatori con lo stelo. Tuttavia, si è deciso di proseguire ugualmente con il dimensionamento in quanto tale impedimento non è direttamente legato alle geometrie e dimensioni ottenute. Il problema infatti è legato maggiormente al corretto funzionamento del dispositivo. Nella fase di flessione massima, lo stelo tende a battere contro la puleggia non garantendo il tensionamento richiesto del filo e impedendo la stessa rotazione della puleggia. Con questa tipologia di attuatore, in base alle dimensioni dello schienale imposte, il dispositivo non lavora correttamente. Nella scelta dell' attuatore infatti, bisogna tenere presente che la corsa va considerata due volte. Anche il tentativo di fissare gli attuatori nella parte più alta dello schienale è risultato vano e sfogliando il catalogo della MetalWorks non sono stati trovati cilindri dello stesso tipo che evitassero tale problematica. In figura viene illustrato il momento in cui lo stelo entra in contatto con la puleggia.*



*Figura 94-Problematica riscontrata. Contatto stelo/puleggia*



Una possibile soluzione a tale impedimento, potrebbe essere quella di adottare un sistema di pulegge atte a ridurre la corsa dell' attuatore. Si tratterebbe di sfruttare due pulegge, una fissa al telaio del back frame e l' altra mobile, collegata allo stelo dell' attuatore e in grado di traslare della quantità di corsa che si intende far risparmiare allo stelo.

In questo modo è possibile ridurre le dimensioni del cilindro che agirebbe solo nel tratto di corsa in cui l' esoscheletro eroga maggior coppia di supporto. Si avrebbero benefici in termini di funzionamento e di peso. Tra gli svantaggi, ci sarebbe da considerare la lunghezza del filo che risulterebbe aumentata e andrebbe gestita onde evitare intralcio durante l' utilizzo del dispositivo, e l' aumento del carico all' altra estremità del filo. Infatti a fronte di uno spostamento  $x$  relativo ad un carico generico, corrisponde uno spostamento doppio con il doppio del carico. Tale trattazione resta aperta per gli studi futuri.

Gli schemi qui di seguito, mostrano la miglioria del sistema appena descritta.

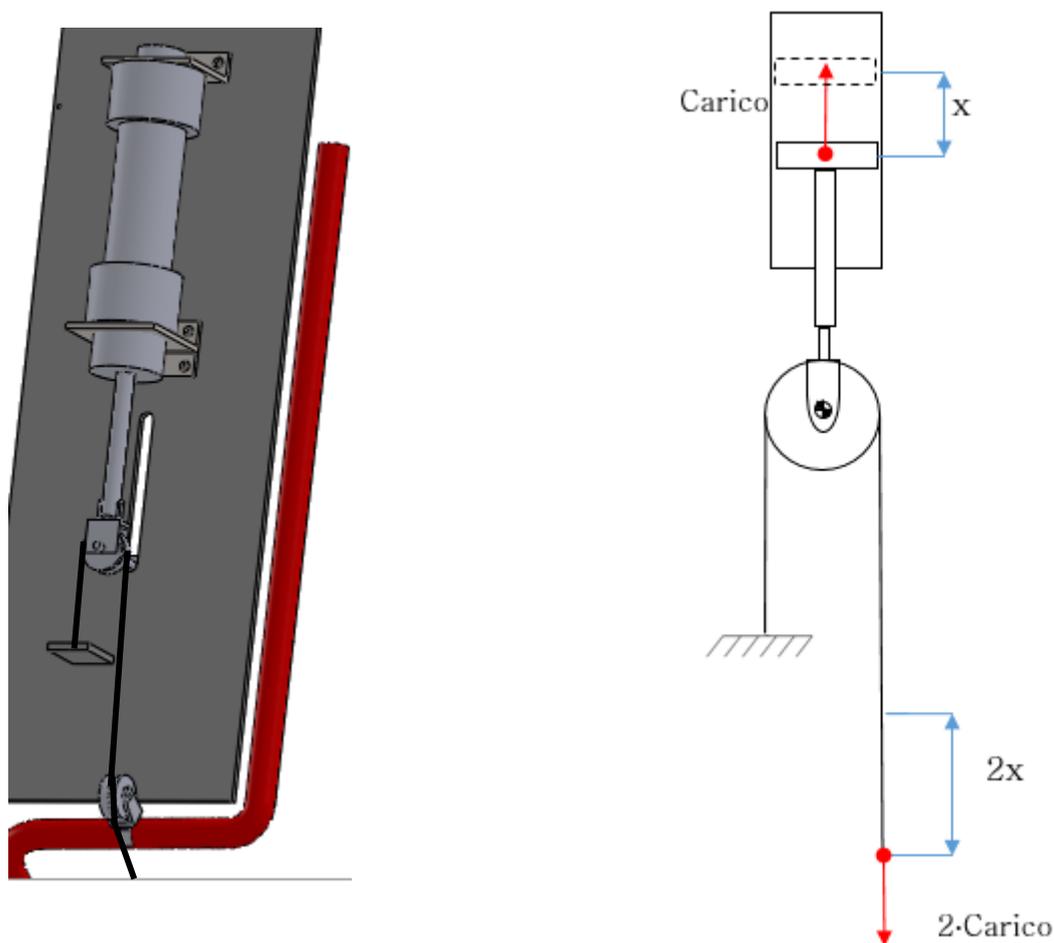


Figura 95-Schema e disegno 3D della potenziale soluzione



## CAPITOLO VIII

### *Analisi FEM elementi struttura*

*In seguito ai risultati e al dimensionamento preliminare degli elementi costituenti l' esoscheletro, è stata realizzata un' analisi ad elementi finiti nell' ottica di verificare l' andamento delle tensioni ottenuto analiticamente e di migliorare eventualmente le dimensioni scelte.*

*Tale tecnica numerica è stata impostata utilizzando il pacchetto Simulation di Solidworks. Il tool chiede in input:*

- *Tipologia di analisi*
- *Vincoli*
- *Carichi gravanti sulla struttura (inserendo punto di applicazione, direzione, verso e intensità)*
- *Materiale elemento*
- *Accuratezza della mesh*

*In particolare sono state realizzate due simulazioni per ogni elemento andando a monitorare l' andamento delle tensioni, il valore dello spostamento e le deformazioni.*

*Tutti gli elementi sono stati esaminati staticamente nella condizione più gravosa, cioè quando l'operatore raggiunge il suo punto di massima flessione.*

*Per la semplicità della geometria si è scelto di adottare una discretizzazione non troppo fitta della mesh che ha permesso di generare risultati approssimativamente attendibili.*

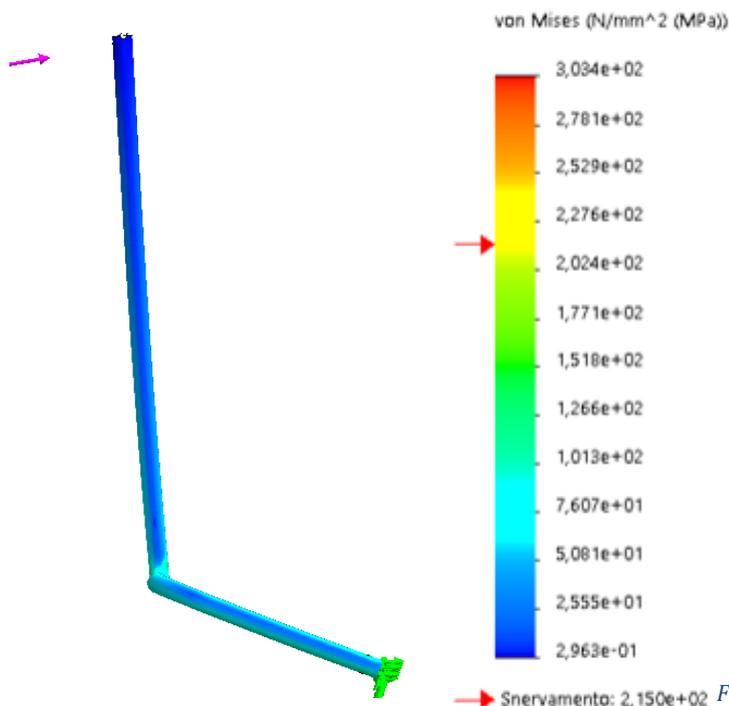
*La gradazione di colori dal blu al rosso permette di identificare a colpo d'occhio le zone più o meno a rischio.*

*Nei prossimi paragrafi si indicheranno nel dettaglio i dati di input inseriti nel tool per ogni elemento e si commenteranno gli andamenti conseguenti.*



## Back Frame: 1<sup>a</sup> simulazione

### - Andamento Tensioni



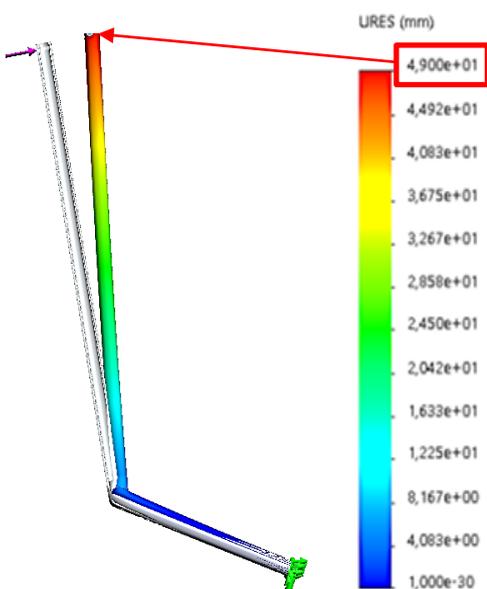
### Dati di input

- **Vincoli:** incastro in corrispondenza del punto di attacco al bacino (indicato in verde nella figura)
- **Carichi :** forza esercitata dagli spallacci e indicata analiticamente con  $R_E = -75.32 \text{ N}$  (in viola nella figura)
- **Materiale elemento:** lega di alluminio 6060 T6
- **Dimensioni struttura :**  $d_{ext} = 17 \text{ mm}$ ,  $d_{int} = 11 \text{ mm}$

→ Snervamento: 2,150e+02 *Figura 96-Tensioni Back Frame, Simulaz.1*

**Risultati :** come si può facilmente notare, la struttura nel suo dimensionamento preliminare, conferma la validità dei calcoli resistendo bene allo sforzo applicato.

### - Spostamento



### Risultati:

si osserva che l' estremità in cui è applicata la forza presenta una zona di colore rosso con uno spostamento massimo pari a 49 mm.

Tale spostamento è sicuramente elevato.

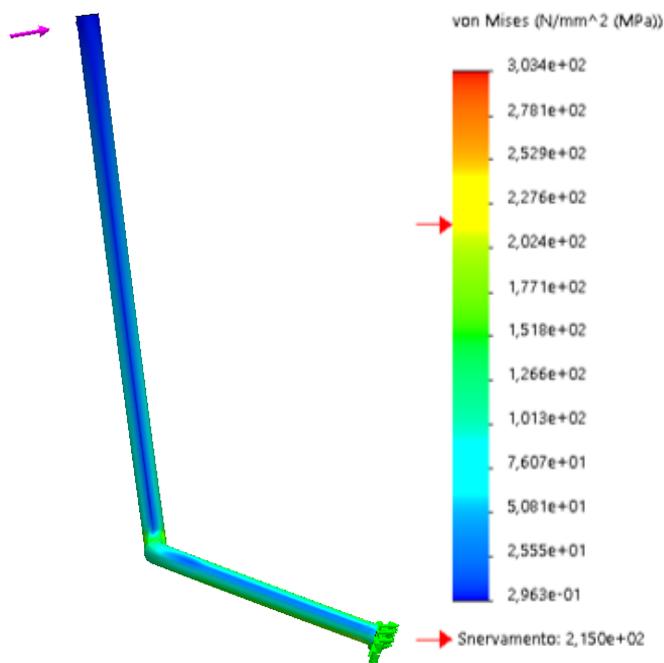
Ciò può dipendere dal tipo di materiale scelto, dalle dimensioni minime e soprattutto dal vincolo impostato. Infatti si ricorda che per tale elemento, è concessa la rotazione nel piano sagittale, dunque ipotizzare un incastro come vincolo potrebbe compromettere il risultato

*Figura 97-Spostamento Back Frame, Simulaz.1*



## Back Frame: 2<sup>a</sup> simulazione

### Andamento Tensioni



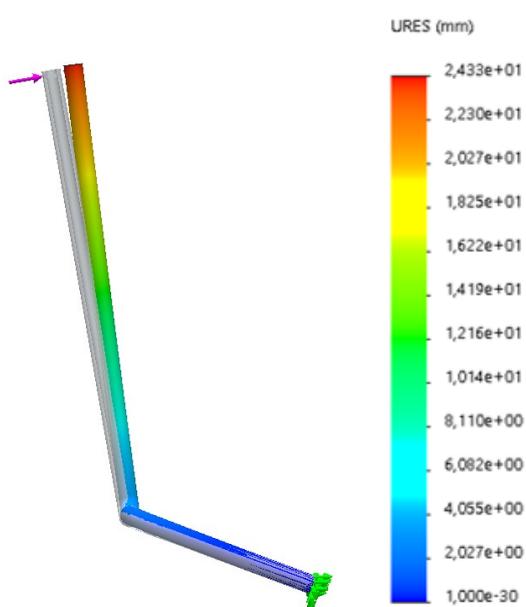
### Dati di input

- **Vincoli** : incastro in corrispondenza del punto di attacco al bacino (indicato in verde nella figura)
- **Carichi** : forza esercitata dagli spallacci e indicata analiticamente con  $R_E = -75.32 N$  ( in viola nella figura)
- **Materiale elemento**: lega di alluminio 6060 T6
- **Dimensioni struttura** :  $d_{ext} = 20 mm$ ,  $d_{int} = 8 mm$

Figura 98-Tensioni Back Frame, Simulaz.2

**Risultati** : come da aspettative, aumentando le dimensioni del diametro esterno a parità di tutte le altre condizioni, la struttura continua a resistere allo sforzo applicato.

### - Spostamento



### Risultati:

si osserva in questo caso che l' estremità in cui è applicata la forza, presenta una zona di colore rosso meno evidente con uno spostamento massimo pari a 24,3 mm.

Tale spostamento resta comunque elevato, e le cause scatenanti sono le stesse presentate nel paragrafo precedente.

Tuttavia è evidente come l' aumento delle dimensioni riduca del 50 % l' effetto della tensione degli spallacci sull' estremità.

Figura 99-Spostamento Back Frame, Simulaz.2



## Link fisso: 1<sup>a</sup> simulazione

### - Andamento Tensioni

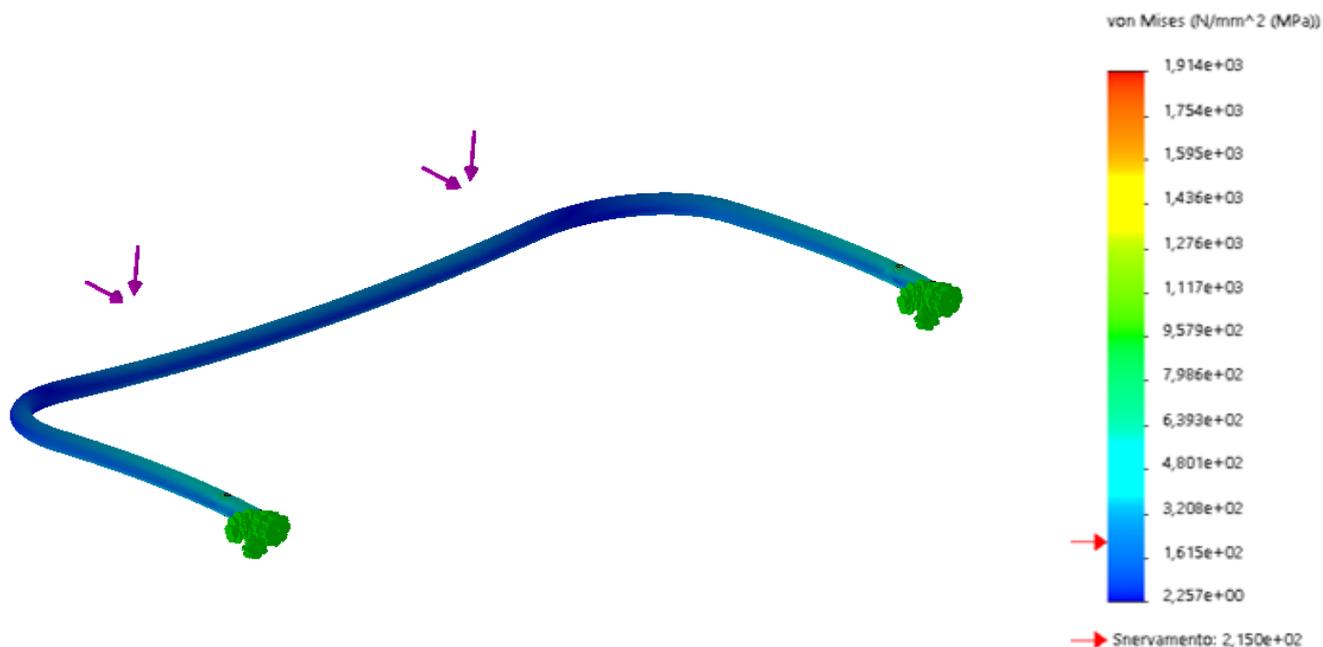


Figura 100-Tensioni Leg-Fisso, Simulaz.1

### Dati di input

- **Vincoli:** doppio incastro in corrispondenza del punto di attacco al bacino (indicato in verde nella figura)
- **Carichi :** forze esercitate dal filo e trasmesse attraverso le pulegge indicate analiticamente come  $R_{pull_{fx}} = 264.60 \text{ N}$  e  $R_{pull_{fy}} = 24.15 \text{ N}$ . (indicate in viola nella figura)
- **Materiale elemento:** lega di alluminio 6060 T5
- **Dimensioni struttura :**  $d_{ext} = 10 \text{ mm}$ ,  $d_{int} = 7 \text{ mm}$

**Risultati:** come si può facilmente notare, la struttura del link fisso nel suo dimensionamento preliminare, conferma anche in questo caso la validità dei calcoli resistendo bene allo sforzo applicato.



- Spostamento

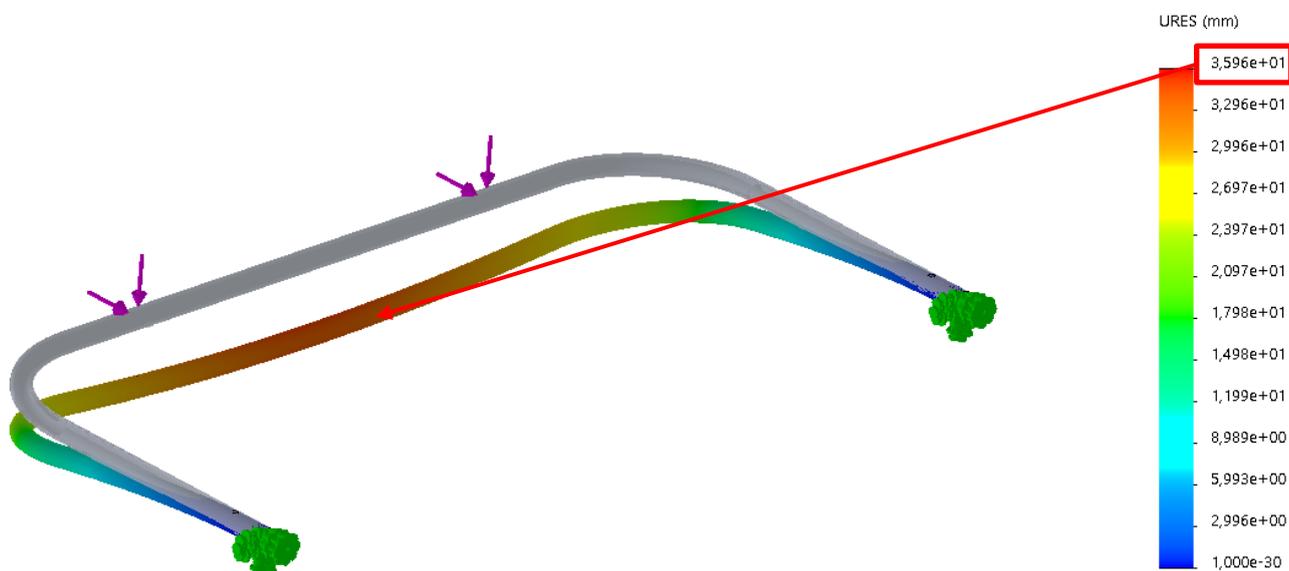


Figura 101-Spostamento Leg-Fisso, Simulaz.1

Dati di input

- **Vincoli:** doppio incastro in corrispondenza del punto di attacco al bacino (indicato in verde nella figura)
- **Carichi :** forze esercitate dal filo e trasmesse attraverso le pulegge indicate analiticamente come  $R_{pull_{fx}} = 264.60 \text{ N}$  e  $R_{pull_{fy}} = 24.15 \text{ N}$ . (indicate in viola nella figura)
- **Materiale elemento:** lega di alluminio 6060 T5
- **Dimensioni struttura :**  $d_{ext} = 10 \text{ mm}$ ,  $d_{int} = 7 \text{ mm}$

Risultati:

si osserva che la zona più soggetta allo spostamento è la traversa, con uno spostamento massimo pari a **35,96 mm**.

Tale spostamento risulta elevato, e le cause scatenanti sono legate al materiale e al dimensionamento preliminare forse non sufficiente a contenere l' effetto degli sforzi.

Una situazione del genere genererebbe un malfunzionamento di tutto il dispositivo.



## Link Fisso: 2<sup>a</sup> simulazione

### - Andamento Tensioni

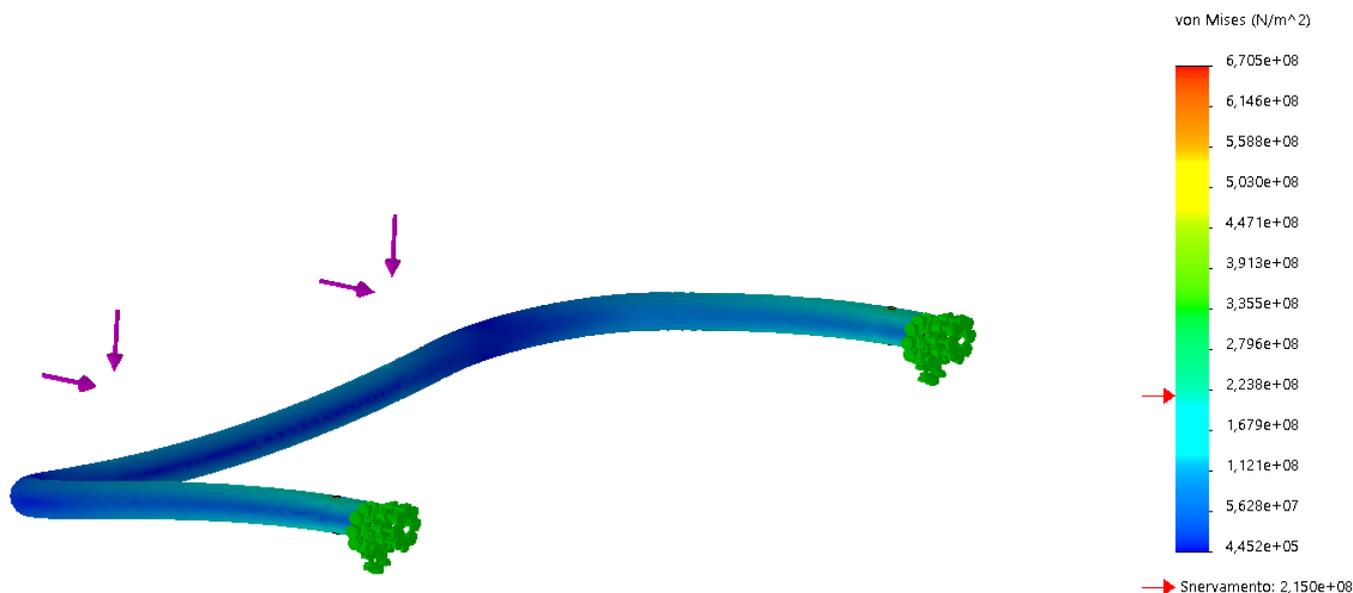


Figura 102-Tensioni Leg-Fisso,Simulaz.2

### Dati di input

- **Vincoli:** doppio incastro in corrispondenza del punto di attacco al bacino (indicato in verde nella figura)
- **Carichi :** forze esercitate dal filo e trasmesse attraverso le pulegge indicate analiticamente come  $R_{pull_{fx}} = 264.60 \text{ N}$  e  $R_{pull_{fy}} = 24.15 \text{ N}$ . (indicate in viola nella figura)
- **Materiale elemento:** lega di alluminio 6060 T5
- **Dimensioni struttura :**  $d_{ext} = 15 \text{ mm}$ ,  $d_{int} = 12 \text{ mm}$

**Risultati:** aumentando le dimensioni dell' elemento fisso, la risposta agli sforzi ne risulta ovviamente migliorata.



## - Spostamento

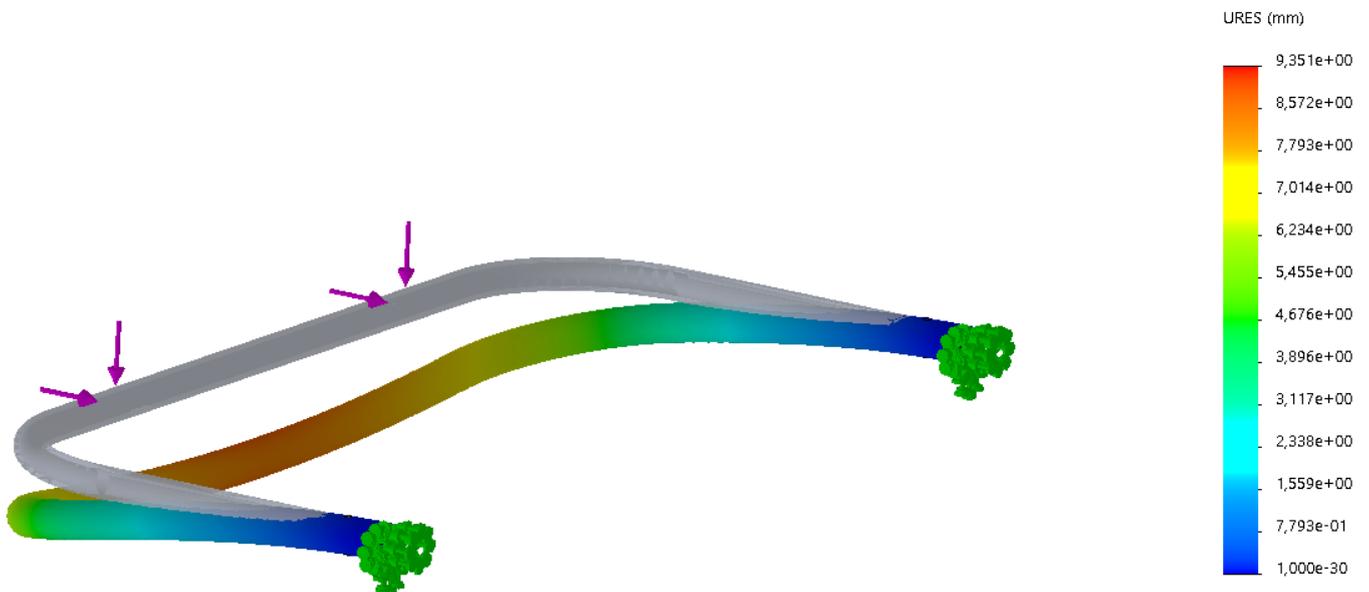


Figura 103-Spostamento Leg-Fisso, Simulaz.2

### Dati di input

- **Vincoli:** doppio incastro in corrispondenza del punto di attacco al bacino (indicato in verde nella figura)
- **Carichi :** forze esercitate dal filo e trasmesse attraverso le pulegge indicate analiticamente come  $R_{pull_{fx}} = 264.60 \text{ N}$  e  $R_{pull_{fy}} = 24.15 \text{ N}$ . (indicate in viola nella figura)
- **Materiale elemento:** lega di alluminio 6060 T5
- **Dimensioni struttura :**  $d_{ext} = 15 \text{ mm}$ ,  $d_{int} = 12 \text{ mm}$

### Risultati:

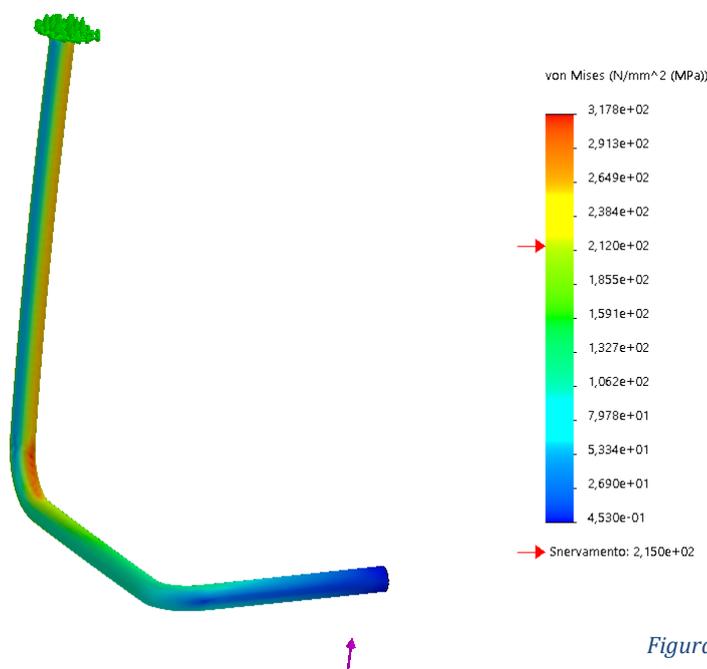
la zona più soggetta allo spostamento resta sempre la traversa, con uno spostamento massimo che però si riduce del 75% e pari a 9.35 mm.

Il valore è nettamente diminuito ma non è accettabile ai fini di un corretto funzionamento.



## Leg Link: 1<sup>a</sup> simulazione

### - Andamento Tensioni



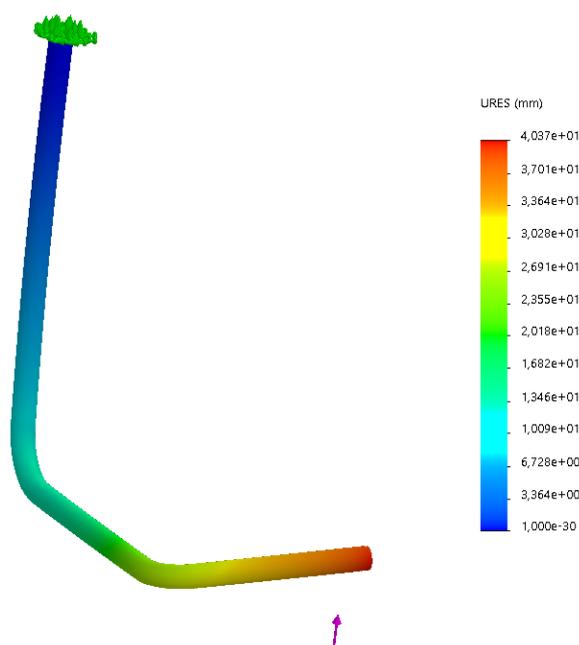
### Dati di input

- **Vincoli:** incastro in corrispondenza del punto di attacco al bacino (indicato in verde nella figura)
- **Carichi:** forza di reazione esercitata dalle cosce e indicata analiticamente con  $R_G = 147.76 \text{ N}$  (in viola nella figura)
- **Materiale elemento:** lega di alluminio 6060 T6
- **Dimensioni struttura:**  $d_{ext} = 11 \text{ mm}$ ,  $d_{int} = 5 \text{ mm}$

Figura 104-Tensioni leg-link, Simulaz. 1

**Risultati:** come si può facilmente notare, la struttura nel suo dimensionamento preliminare, conferma la validità dei calcoli presentando una zona rossa in corrispondenza dell'angolo.

### - Spostamento



### **Risultati:**

si osserva che l'estremità in cui è applicata la forza spostamento massimo pari a **40,3 mm**.

Tale spostamento è sicuramente elevato. Ciò può dipendere dal tipo di materiale scelto, dalle dimensioni minime e soprattutto dal vincolo impostato.

Infatti si ricorda che per tale elemento, è concessa la rotazione nel piano sagittale, dunque ipotizzare un incastro come vincolo comprometterebbe il risultato

Figura 105-Spostamento Leg-Link, Simulaz. 1



## Leg Link: 2<sup>a</sup> simulazione

### - Andamento Tensioni

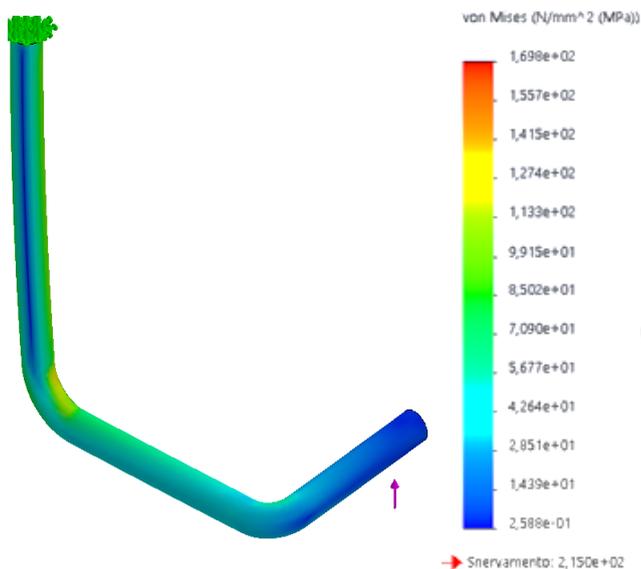


Figura 106-Tensioni Leg-Link, Simulaz.2

### -Dati di input

- **Vincoli** : incastro in corrispondenza del punto di attacco al bacino (indicato in verde nella figura)
- **Carichi** : forza di reazione esercitata dalle cosce e indicata analiticamente con  $R_G = 147.76 \text{ N}$  ( in viola nella figura)
- **Materiale elemento**: lega di alluminio 6060 T6
- **Dimensioni struttura** :  $d_{ext} = 14 \text{ mm}$ ,  $d_{int} = 10 \text{ mm}$

**Risultati** : come da aspettative, aumentando le dimensioni del diametro esterno a parità di tutte le altre condizioni, la struttura resiste allo sforzo applicato.

### - Spostamento

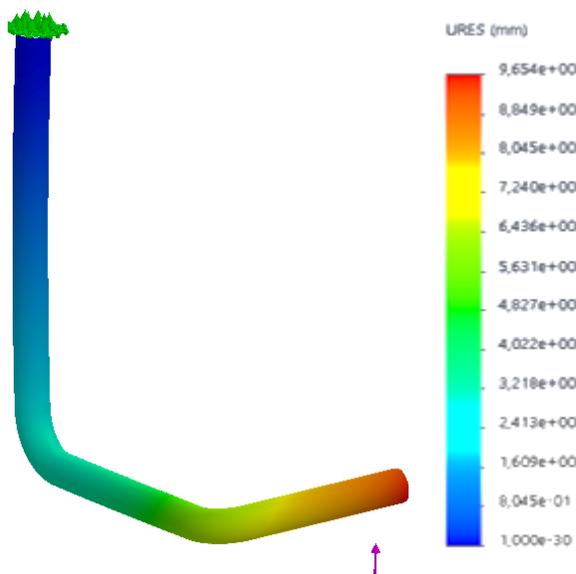


Figura 107-Spostamento Leg-Link, Simulaz.2

### - **Risultati:**

anche in questo caso l' estremità in cui è applicata la forza, presenta una zona di colore rosso meno evidente con uno spostamento massimo pari a **9,65 mm**.

Tale spostamento resta comunque elevato, e le cause scatenanti sono le stesse presentate nel paragrafo precedente.

Tuttavia è evidente come l' aumento delle dimensioni riduca più del **70%** l' effetto della tensione degli spallacci sull' estremità.



## Commento e considerazioni post simulazione

Si è visto che per tutti e tre gli elementi, irrobustire la struttura porta beneficio sia in termini di resistenza alle sollecitazioni sia in termini di spostamento.

Tuttavia, è bene concentrarsi su una delle specifiche fondamentali di tale progetto: il peso. L' aumento delle dimensioni genera una variabilità di tale fattore non indifferente.

Andiamo a confrontare il valore del peso valutato sia con le dimensioni preliminari che con le dimensioni aumentate.

### Back Frame:

- |   |   |
|---|---|
| • $d_{ext} = 17 \text{ mm}$ , $d_{int} = 11 \text{ mm}$ | • $d_{ext} = 20 \text{ mm}$ , $d_{int} = 8 \text{ mm}$  |
| • Lega alluminio 6060 T6                                | • Lega alluminio 6060 T6  |
| • $Peso = 0,298 \text{ kg}$                             | • $Peso = 0,597 \text{ kg}$  + 50% |

### Link-fisso:

- |  |   |
|--|---|
| • $d_{ext} = 10 \text{ mm}$ , $d_{int} = 7 \text{ mm}$ | • $d_{ext} = 15 \text{ mm}$ , $d_{int} = 12 \text{ mm}$   |
| • Lega alluminio 6060 T5                               | • Lega alluminio 6060 T5  |
| • $Peso = 0,0859 \text{ kg}$                           | • $Peso = 0,136 \text{ kg}$  + 62,8% |

### Leg-Link:

- |  |  |
|--|--|
| • $d_{ext} = 11 \text{ mm}$ , $d_{int} = 5 \text{ mm}$ | • $d_{ext} = 14 \text{ mm}$ , $d_{int} = 10 \text{ mm}$  |
| • Lega alluminio 6060 T6                               | • Lega alluminio 6060 T6   |
| • $Peso = 0,0923 \text{ kg}$                           | • $Peso = 0,0721 \text{ kg}$  - 22% |

Il prospetto appena illustrato palesa che le variabili da considerare sono: il materiale e le dimensioni disponibili sul catalogo. Mantenendo lo stesso materiale per le due simulazioni, l' effetto della variazione delle dimensioni **non** è trascurabile. Il peso totale della struttura a fronte di queste scelte è pari a :

$$Back\_Frame(x2) + Leg\_Fisso + Leg\_Link(x2) = 2 \cdot 0.597 + 0.136 + 2 \cdot 0.0721 = 2.80 \text{ Kg}$$

Valore a cui bisogna aggiungere il peso degli attuatori e di tutti gli altri componenti esistenti sul dispositivo. Tuttavia, le prove sperimentali successive alla realizzazione del prototipo dimostreranno quanto sia opportuno variare una o l' altra variabile per ridurre ancora il peso della struttura.



---

## CAPITOLO IX

### *Conclusioni e Sviluppi Futuri*

*Il dispositivo, nonostante le problematiche riscontrate, soddisfa tutte le verifiche effettuate presentando una buona resistenza alle sollecitazioni. Anche le specifiche iniziali di peso e ingombro rientrano nei limiti imposti, come abbiamo visto. È bene precisare che, il valore scelto in partenza del coefficiente di sicurezza tiene conto di tutte le semplificazioni fatte per rendere lo studio più accessibile e per contenere le eventuali deformazioni che si verificherebbero con un diametro della struttura troppo basso.*

*Le prove sperimentali che verranno eseguite una volta realizzato il prototipo, andranno a considerare nella pratica tutti i potenziali impedimenti legati ai punti d' attacco uomo-dispositivo verificando se si genera disagio.*

*Si potrebbe per esempio analizzare il caso in cui i tre elementi della struttura avessero due diversi punti d' attacco. In questo modo si ridurrebbero le dimensioni del perno attuale e si diminuirebbe il rischio di fastidio percepito dall' operatore nel contatto tra giunti e bacino.*

*Le soluzioni suggerite e le migliorie che potranno applicarsi al dispositivo, restano un punto di partenza per eventuali studi futuri.*

*Sarà interessante andare a progettare il sistema di controllo per gestire il corretto afflusso d' aria nei cilindri durante i movimenti di flessione ed estensione del tronco. Un' idea potrebbe consistere in un controllo posizione dando come dato di input l' angolo assunto dall' operatore.*

*Cimentarsi nella progettazione di un esoscheletro di tipo attivo è sicuramente stimolante. L' ormai palese interesse delle aziende per tale tipo di tecnologia, rende la ricerca sempre più vivace con l' obiettivo di colmare gli attuali gap legati alle prestazioni e alla sicurezza per poter rendere l' esoscheletro accessibile a tutti.*



## APPENDICE A1

### Dimensionamento Perno

Il perno pur non essendo l'elemento principale su cui si è focalizzato il progetto, non è da trascurare. Come abbiamo visto, costituisce il punto d'attacco di tutti gli elementi della struttura e pertanto deve rispondere adeguatamente alle sollecitazioni. Il metodo utilizzato per il dimensionamento è lo stesso fin'ora adottato.

Per ciò che riguarda i vincoli, essendo un componente fisso è stato analizzato considerando entrambi gli estremi incastrati.

Lo schema iniziale risulta il seguente:

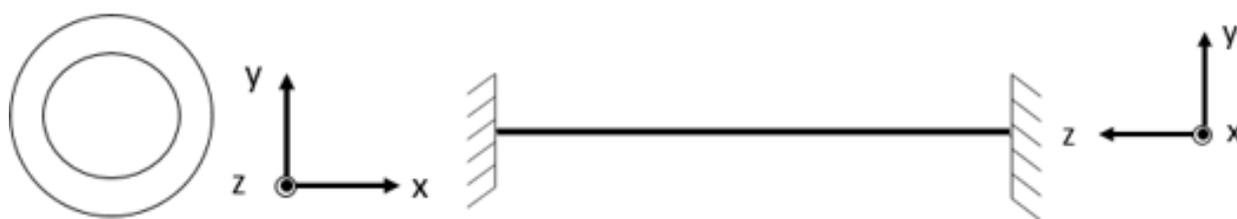


Figura 108-Modello matematico del Perno

Lo schema nel piano xz è la stesso del piano yz pertanto tale vista è stata omessa.

Si determinano ora le reazioni vincolari utilizzando la sovrapposizione degli effetti.

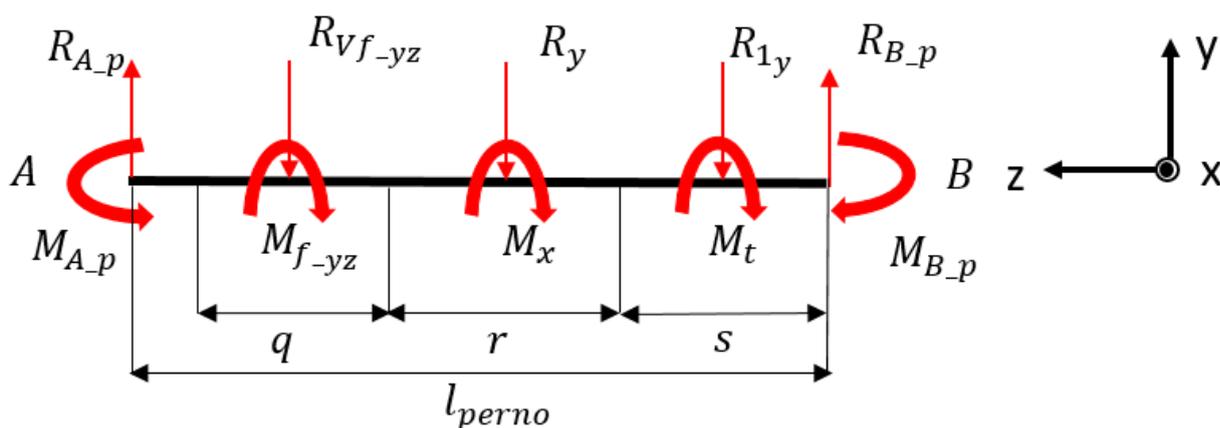


Figura 109-Carichi esterni agenti sul perno nel piano yz



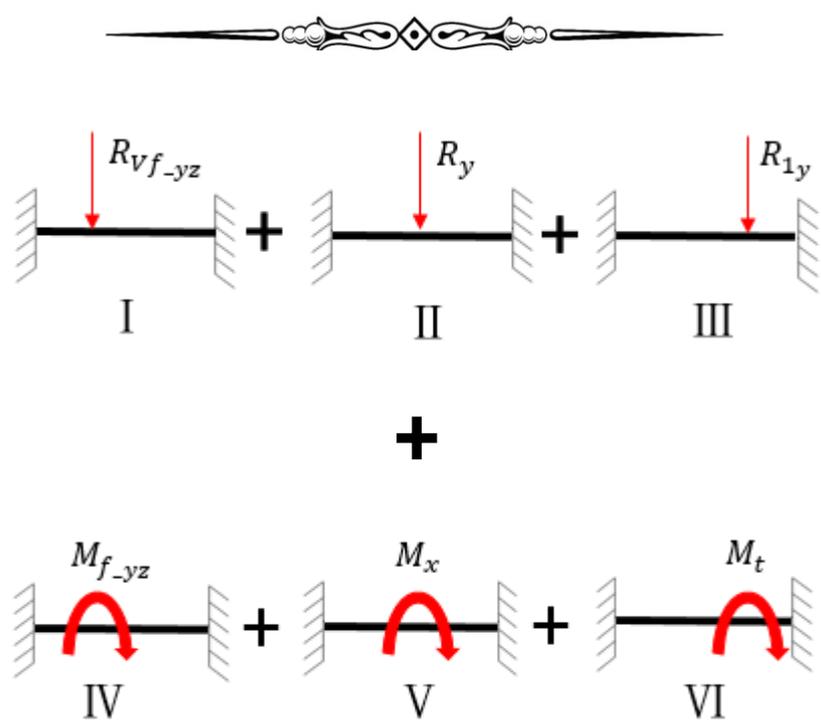


Figura 110-Suddivisione perno in sottotravi

Il perno presenta sollecitazioni dovute a forze di taglio lungo l'asse y e momenti flettenti lungo l'asse x. Adottando le soluzioni presenti sul manuale dell'ingegnere meccanico per casi noti di travi iperstatiche, si ottengono le seguenti espressioni per le incognite cercate:

$$R_{A,p} = P \cdot \frac{b^2}{l_{perno}^3} \cdot (l_{perno} + 2 \cdot a)$$

$R_{A,p}$	<b>P</b>	<b>b</b>	<b>a</b>	$R_{B,p}$
I	$R_{Vfy}$	$q/2 + r + s$	$c + q/2$	$R_{Vfy} - R_{A,p}$
II	$R_y$	$r/2 + s$	$c + r/2 + q$	$R_y - R_{A,p}$
III	$R_{1y}$	$s/2$	$l_{perno} - s/2$	$R_{1y} - R_{A,p}$

$$R_{A,p}^{tot} = R_{A,p} I + R_{A,p} II + R_{A,p} III + R_{A,p} IV$$



Allo stesso modo si ha per i momenti:

$$M_{A_p} = C \cdot \frac{b}{l_{perno}} \cdot \left( 3 \cdot \frac{a}{l_{perno}} - 1 \right)$$

$M_{A_p}$	C	b	a
I	$M_{f_{yz}}$	$q/2 + r + s$	$c + q/2$
II	$M_x$	$r/2 + s$	$c + r/2 + q$
III	$M_t$	$s/2$	$l_{perno} - s/2$

$$M_{A_p tot} = M_{A_p I} + M_{A_p II} + M_{A_p III} + M_{A_p IV}$$

per la determinazione del momento agente sull' estremo B è sufficiente sostituire il termine  $a$  con  $b$  e viceversa.

L' approccio utilizzato per la determinazione degli sforzi nel piano xz è il medesimo. Si deve soltanto prestare attenzione al cambio di verso delle forze e dei momenti e di conseguenza al cambio di segno nelle espressioni sopra ricavate.

Riportiamo la trave con i carichi esterni per chiarire meglio.

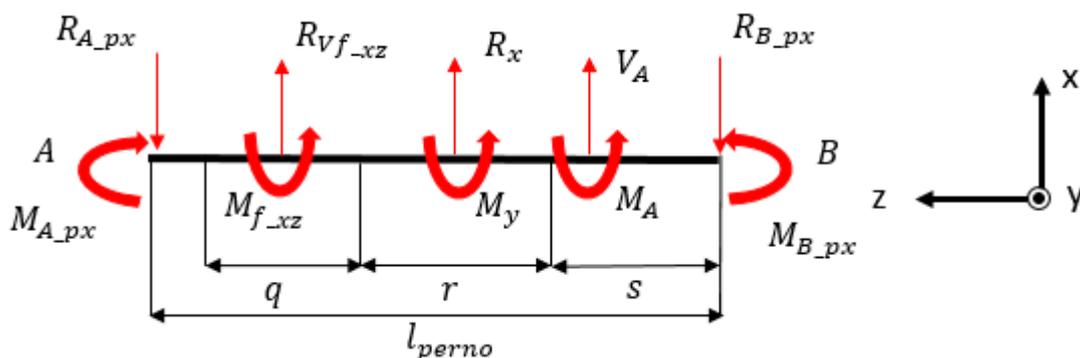


Figura 111-Carichi esterni agenti sul perno nel piano xz

Ricavate tutte le forze incognite agenti sul perno, tramite Ftool sono stati tracciati gli andamenti del taglio e del momento flettente, successivamente sfruttati per il calcolo del diametro minimo.

Si riportano in seguito i diagrammi



Piano yz

T

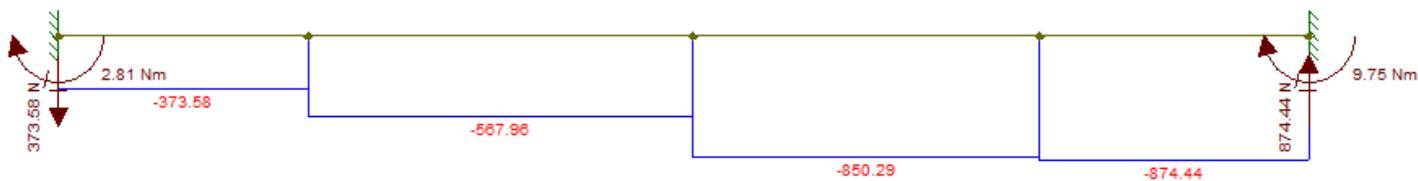


Figura 112-Taglio nel piano yz

M

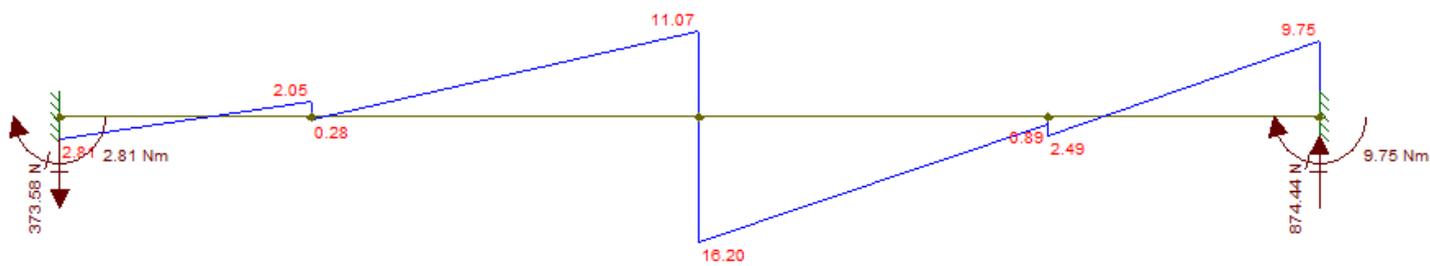


Figura 113-Momento flettente piano yz



Piano xz

T

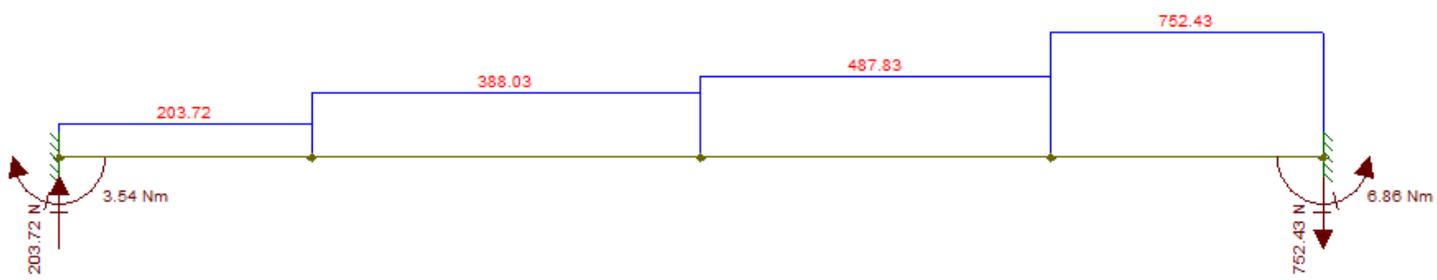


Figura 114-Taglio nel piano xz

M

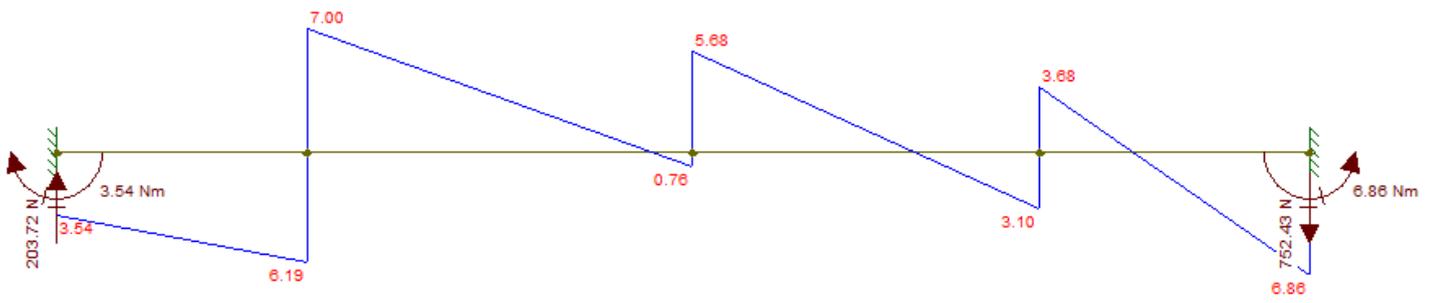


Figura 115-Momento flettente piano xz



Nel piano  $yx$ , il perno risulta sollecitato a torsione per effetto della coppia erogata dall' esoscheletro e ne si terrà conto nel calcolo del diametro.

#### Definizione geometrie.

Si è visto che, nella prospettiva di ingombrare il meno possibile, la lunghezza del perno è stata definita pari a **65 mm**. Si ricorda che ogni giunto d' attacco, occupa in fase di accoppiamento una porzione della lunghezza totale del perno che sarà così ripartita:

- $c = 5 \text{ mm}$
- $q = 16 \text{ mm}$
- $r = 24 \text{ mm}$
- $s = 20 \text{ mm}$

La quantità indicata con la lettera "c" è stata successivamente aggiunta per permettere di ricavare le sedi degli anelli di sicurezza in modo da evitare una fuoriuscita laterale durante l' utilizzo. Le altre grandezze corrispondono nell' ordine:

- Sede di attacco Leg-Link
- Sede di attacco Back Frame
- Sede di attacco Leg-fisso.

Per quanto concerne la determinazione dei diametri caratterizzanti il perno, si è seguito lo stesso iter di sempre. Onde evitare di appesantire la trattazione verranno riportati i dati del materiale e i diametri ottenuti per ogni porzione sopracitata sfruttando i diagrammi degli sforzi e le oramai note relazioni.

Materiale:

*Lega Al 2011 T8*

Carico di Snervamento:

$$R_{p0.2} = 315 \text{ Mpa}$$

Coefficiente di sicurezza ipotizzato:

$$C.S = 2.$$

Diametro sede Leg-Link

$$M_{fid} = \sqrt{M_{f_{xz}}^2 + M_{f_{yz}}^2} = 13.4 \text{ Nm}$$

$$d_{min} = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot M_{fid}}{\pi \cdot \sigma_{amm}}} = 9.53 \text{ mm} \rightarrow \mathbf{12 \text{ mm}} \text{ (definitivo da Catalogo ALQ)}$$



Diametro sede Back-Frame

$$M_{fid} = \sqrt{M_x^2 + M_y^2 + 0.75 \cdot C_{exo}^2} = 83.57 \text{ Nm}$$

$$d_{min} = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot M_{fid}}{\pi \cdot \sigma_{amm}}} = 17.54 \text{ mm} \rightarrow \mathbf{20 \text{ mm}} \text{ (definitivo da Catalogo ALQ)}$$

Diametro sede Leg-Fisso

$$M_{fid} = \sqrt{M_A^2 + M_t^2} = 6.96 \text{ Nm}$$

$$d_{min} = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot M_{fid}}{\pi \cdot \sigma_{amm}}} = 6.08 \text{ mm} \rightarrow \mathbf{10 \text{ mm}} \text{ (definitivo da Catalogo ALQ)}$$

Si mostrano in figura il componente ottenuto e l'esplosivo con i tre giunti.

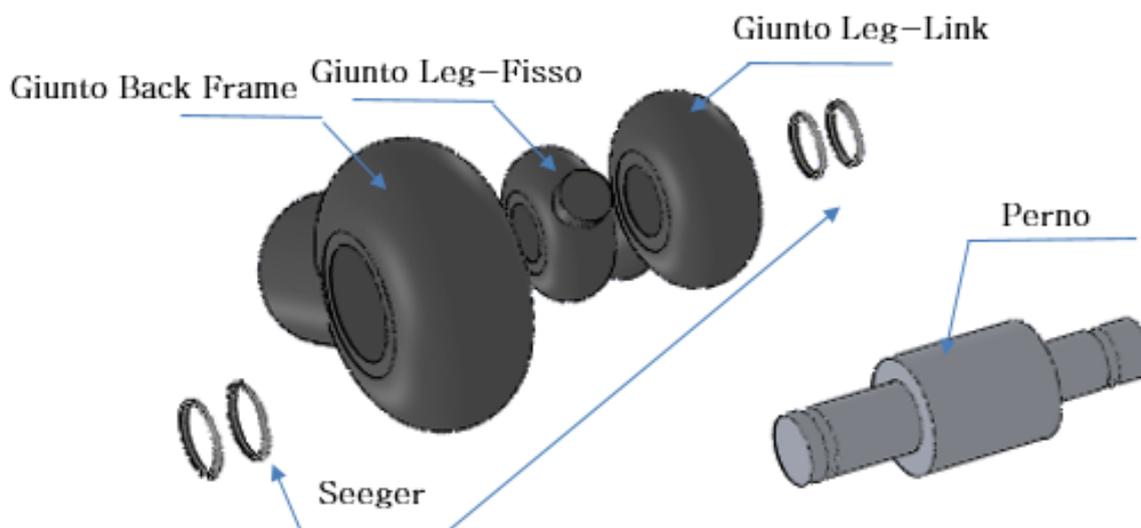


Figura 116-Perno +esplosivo dei giunti d'attacco



## APPENDICE A2

### Scelta attacchi per i 3 elementi della struttura

#### - Back Frame e Leg-Link

Per garantire l' attacco al perno sia del Back Frame che del Leg Link si è deciso di adottare delle teste a snodo con cuscinetto a doppia corona di sfere integrato. Sono progettate per resistere molto bene agli sforzi radiali e garantiscono una resistenza agli sforzi assiali pari al 20 % del carico radiale massimo. Dal CATALOGO ISB sono stati scelte le teste a snodo sotto riportate.

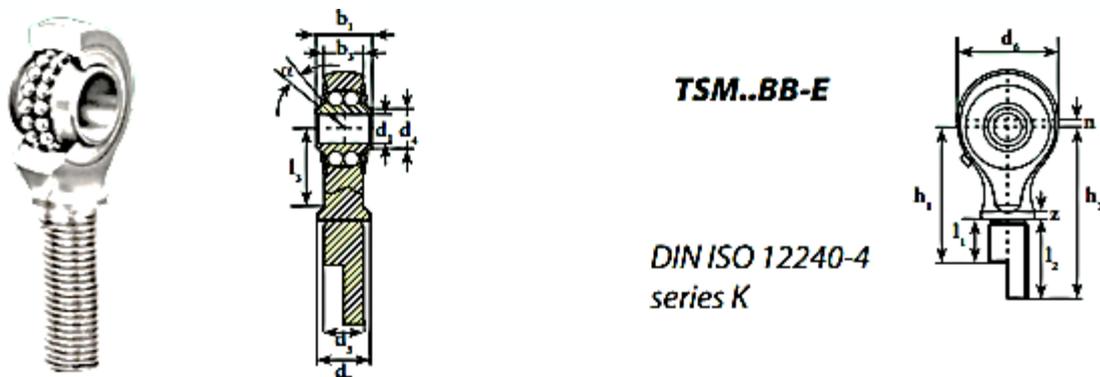


Figura 117-Testa a snodo con cuscinetto a doppia corona di sfere integrato

#### Caratteristiche testa a snodo per Leg-Link

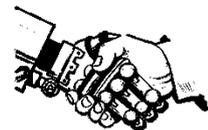
Sigla <sup>1)</sup> Designation <sup>1)</sup>	Dimensioni mm Dimensions mm									Gradi Degrees	Fattori di calcolo Calculation factors		Velocità limite Limit speed	Coefficienti di Carico Ratings load		Peso Weight
	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	d <sub>4</sub>	d <sub>6</sub>	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	h	l	l <sub>1</sub>		≈ α	Y		Y <sub>0</sub>	N <sub>max</sub> (Min <sup>-1</sup> )	
<b>TSM 12 BB-0</b>	12	M12	14.5	32	16	12.0	54	33	19	7.5	1.74	1.82	1125	4,95	1,8	0.087

Figura 118-Dati Testa a snodo per Leg-Link

#### Caratteristiche testa a snodo per Back-Frame

Sigla <sup>1)</sup> Designation <sup>1)</sup>	Dimensioni mm Dimensions mm													Gradi Degrees	Fattori di calcolo Calculation factors		Velocità limite Limit speed	Coefficienti di Carico Ratings load		Peso Weight	
	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	d <sub>4</sub>	d <sub>6</sub>	d <sub>7</sub>	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	l <sub>1</sub>	l <sub>2</sub>	l <sub>3</sub>	h <sub>1</sub>	h <sub>2</sub>	u		z	≈ α		Y	Y <sub>0</sub>		N <sub>max</sub> (Min <sup>-1</sup> )
<b>TSM 20-00 BB-E</b>	20	M24x1.5	24.0	56	30	24	18	-	68.5	41	-	117	3.5	3.0	5.5	2.76	2.90	780	6,17	3,15	0.587

Figura 119-Dati Testa a snodo per Back Frame



- Leg-Fisso

L' attacco dell' elemento fisso, non richiede un cuscinetto integrato in quanto è completamente fissato sul perno. Proprio per questo si è optato per un tirante ad occhio, anch' esso scelto dal CATALOGO NORELEM. Qui di seguito le caratteristiche.

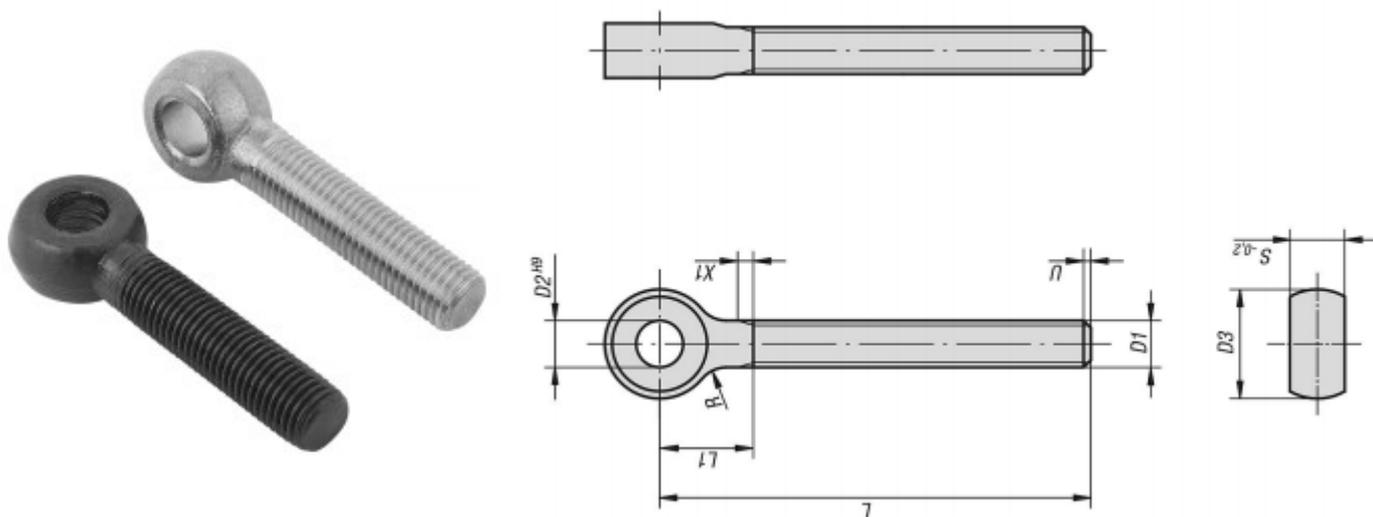


Figura 120-Tirante ad occhio per Leg Fisso

N. ordine	Materiale corpo base	D1	D2	D3	L	L1 max.	R	S
07181-10120	Acciaio	M10	10	20	120	18	4	12

Figura 121-Dati Tirante ad occhio per Leg-Fisso

Le caratteristiche degli elementi di collegamento illustrate sono compatibili con le dimensioni del perno, tuttavia sono necessarie delle riduzioni per l' attacco con la controparte. Per il Leg-Link, oltre alla testa a snodo è necessario un giunto a snodo che va a collegarsi per un' estremità alla testa a snodo e per l' altra al Leg Link in modo da garantire l' abduzione/adduzione della gamba.

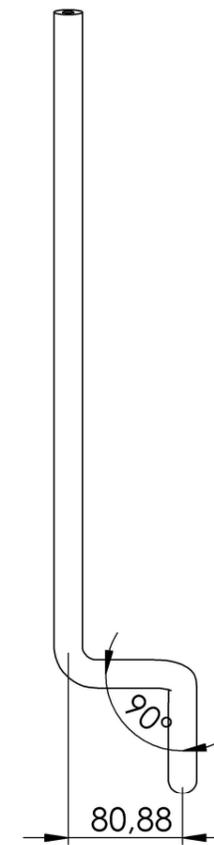
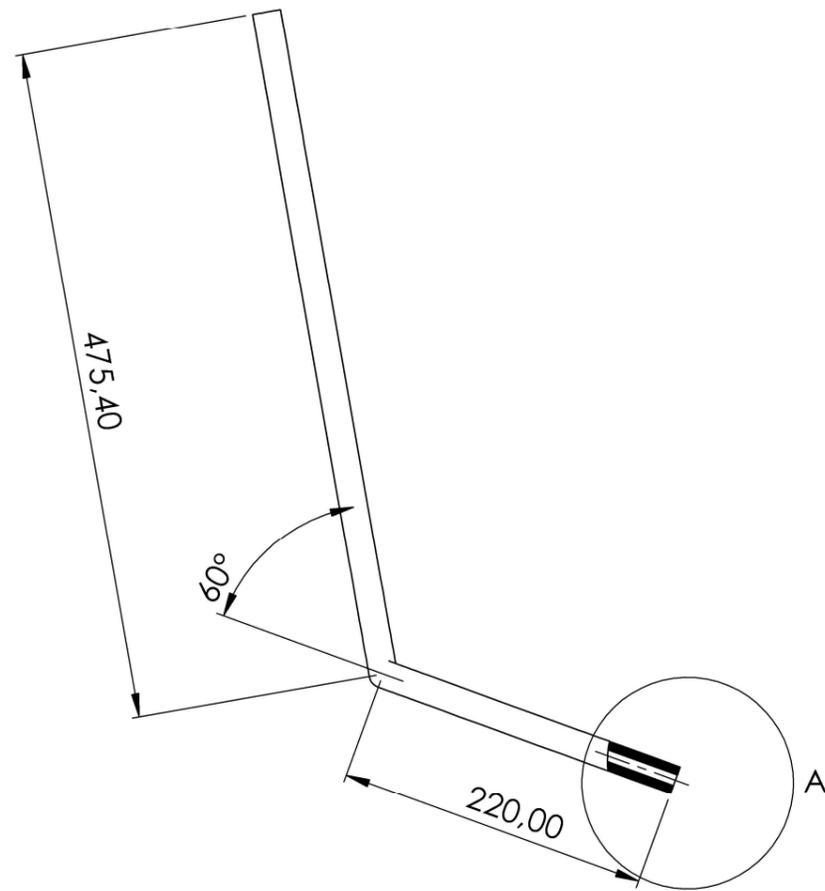


## APPENDICE A3

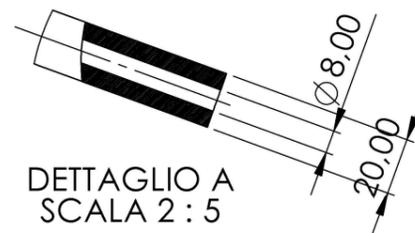
### *Messe in tavola*

*A seguire, vengono riportate le messe in tavola dei seguenti componenti:*

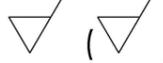
- *Back Frame (parte dx e sx)*
- *Leg-Link (parte dx e sx)*
- *Leg Fisso*
- *Perno*
- *Piastra di chiusura*

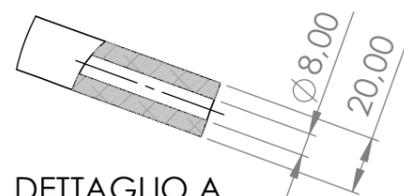
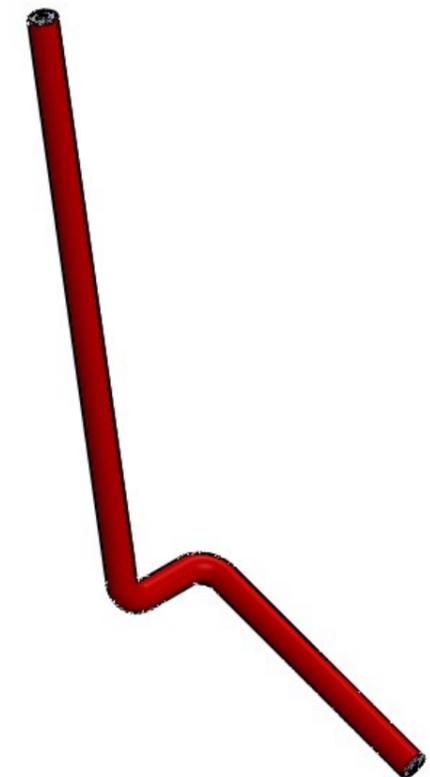
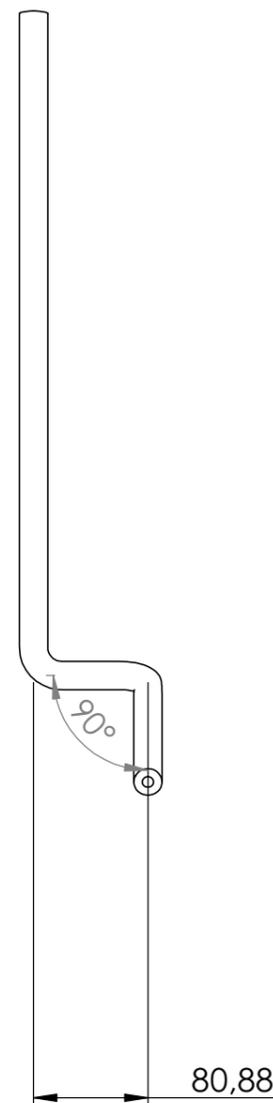
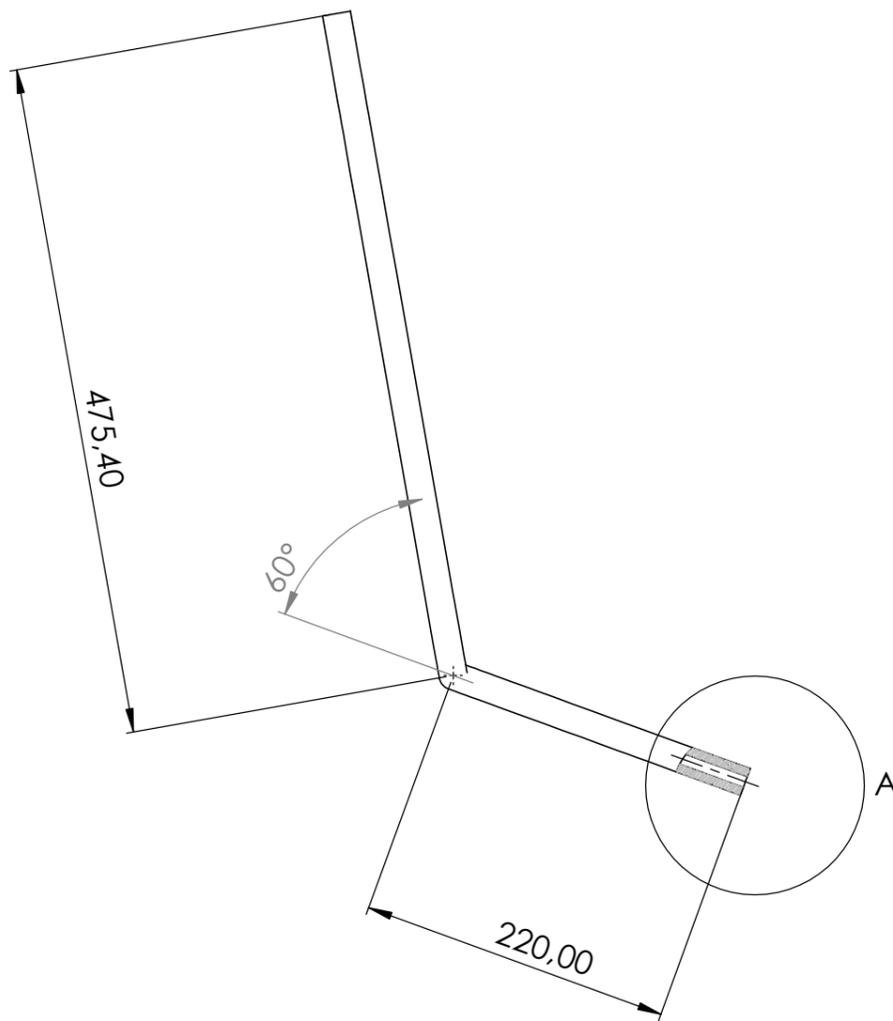


UNI EN 22768-mK 0.5x45°



DETTAGLIO A  
SCALA 2 : 5

# 1	MATERIAL <b>Lega 6060 T6</b>	STUDENT <b>Ignazio Pappadà</b>	Build 15/09/2019 12:24:29
SUBJECT <b>Componenti Esoscheletro</b>	DESCRIPTION Braccio_Mobile_parte sx	COURSE <b>Tesi Magistrale-Ing.Meccanica</b>	SCALE 1:5
			DATE 06/12/2019
 <b>Politecnico di Torino</b>		SURFACE TEXTURE (  )	WEIGHT (Kg)
		PAPER A3 1/1	Drawing N.
Politecnico di Torino - Corso Duca degli Abruzzi, 24 - 10129 TORINO			

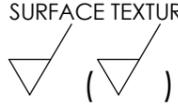


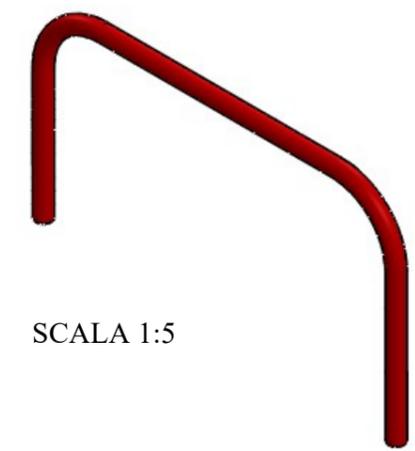
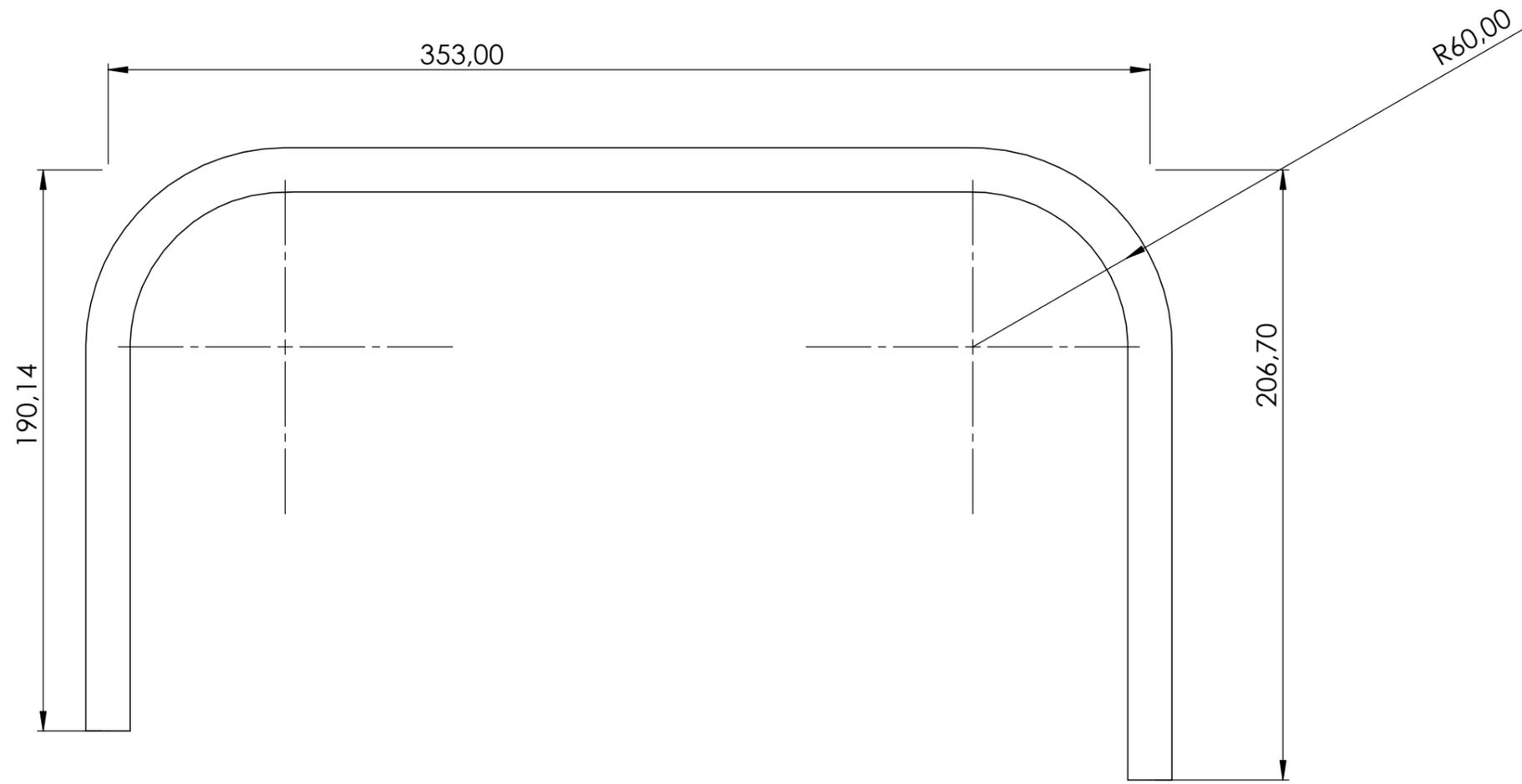
DETTAGLIO A  
SCALA 2 : 5

Raccordi non quotati R 20

UNI EN 22768-mK

0.5x45°

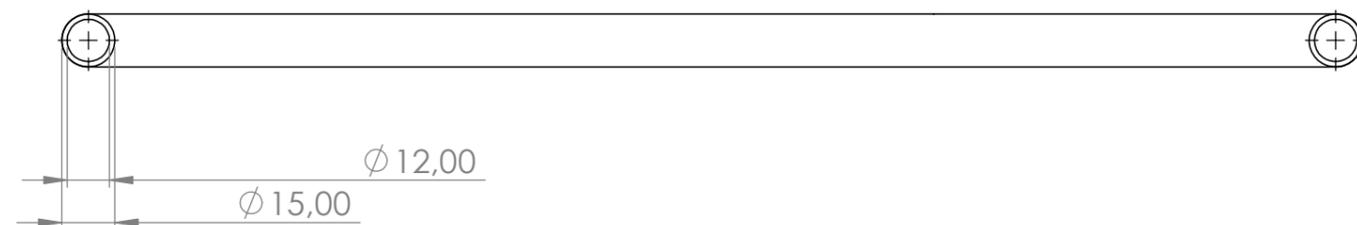
# <b>1</b>	MATERIAL <b>Lega 6060 T6</b>	STUDENT <b>Ignazio Pappadà</b>	Build 15/09/2019 12:24:29
SUBJECT <b>Componente Esoscheletro</b>	DESCRIPTION Braccio_Mobile_parte dx	COURSE <b>Tesi Magistrale-Ing.Meccanica</b>	SCALE 1:5
			DATE 06/12/2019
 <b>Politecnico di Torino</b> <small>Politecnico di Torino - Corso Duca degli Abruzzi, 24 - 10129 TORINO</small>		SURFACE TEXTURE  ( )	WEIGHT (Kg)
		PAPER A3 1/1	Drawing N.

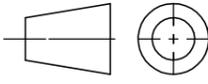


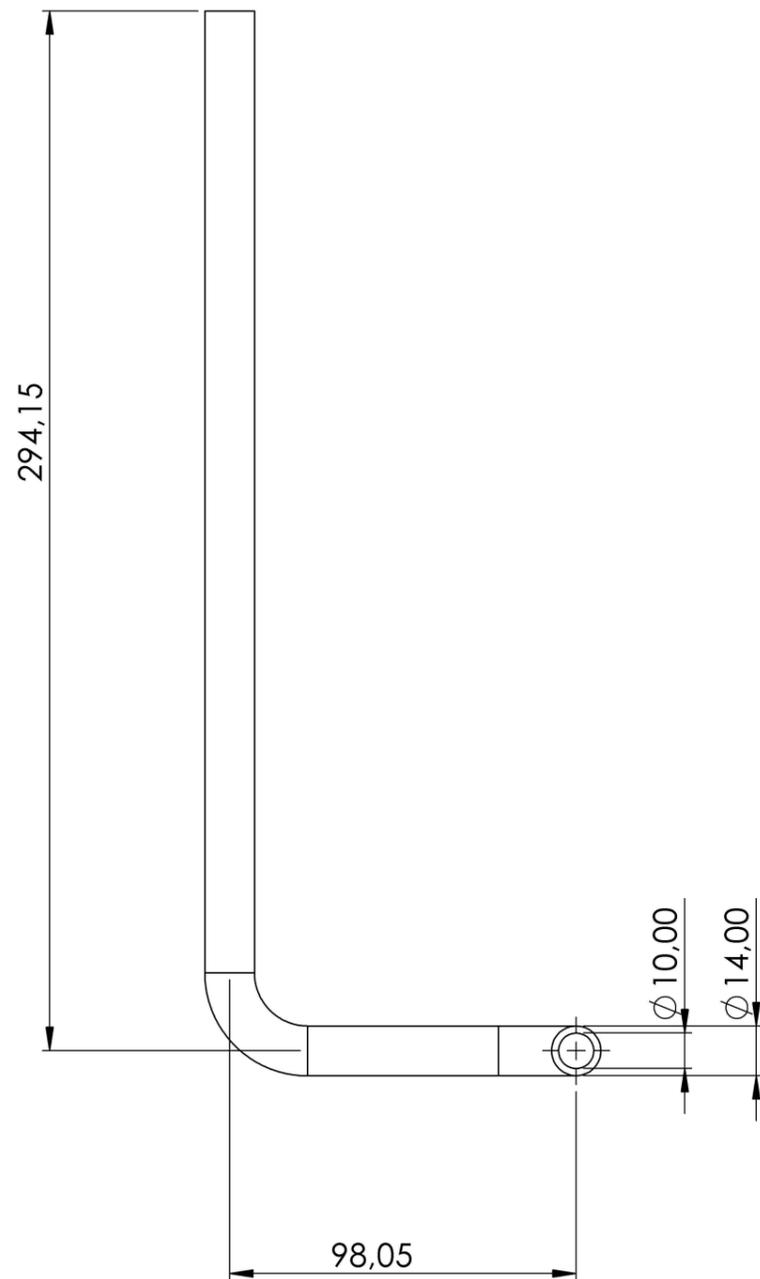
SCALA 1:5

UNI EN 22768-mK

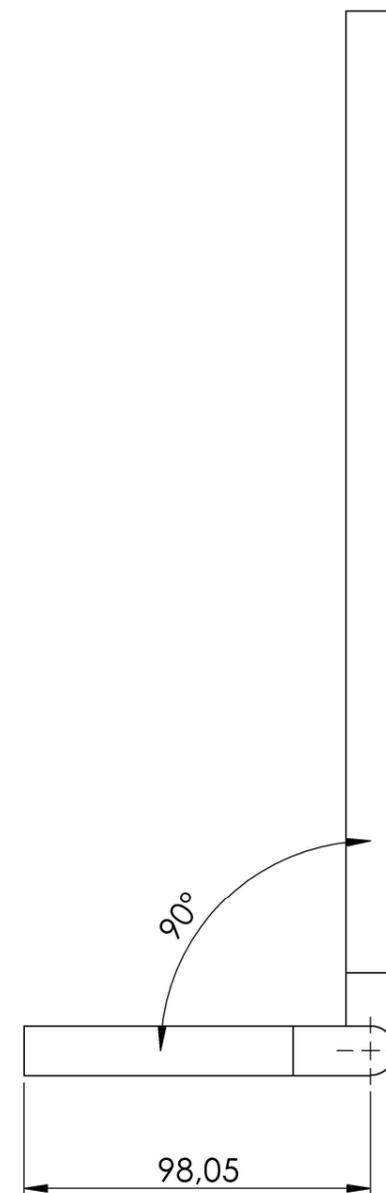
0.5x45°



# 1	MATERIAL <b>Lega 6060 T5</b>	STUDENT <b>Ignazio Pappadà</b>	Build 15/09/2019 01:15:08
SUBJECT <b>Componente Esoscheletro</b>	DESCRIPTION Braccio_Fisso_real dimension	COURSE <b>Tesi Magistrale-Ing.Meccanica</b>	SCALE 1:2
			DATE 06/12/2019
 <b>Politecnico di Torino</b>	SURFACE TEXTURE (  )	WEIGHT (Kg)	
	PAPER A3 1/1	Drawing N.	
Politecnico di Torino - Corso Duca degli Abruzzi, 24 - 10129 TORINO			



SCALA 1:2



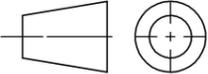
SCALA 1:2

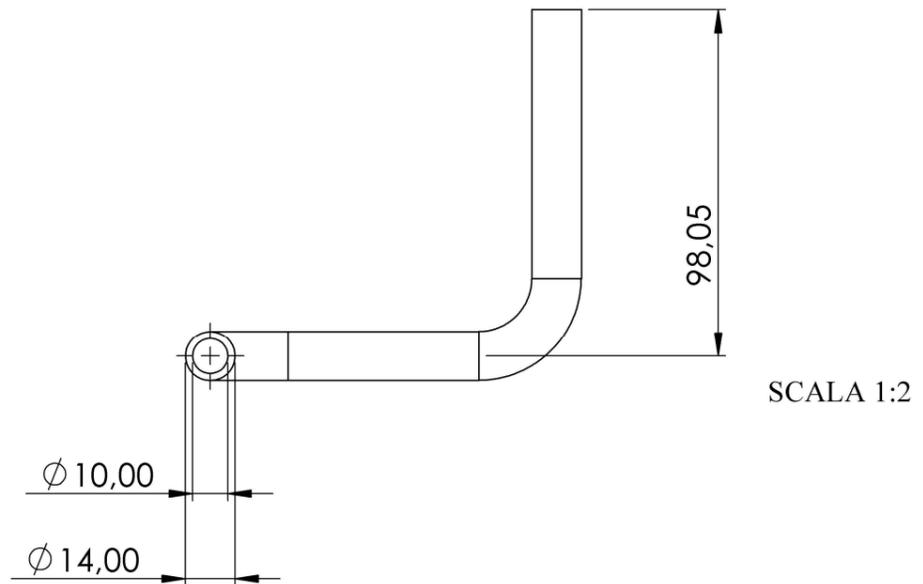
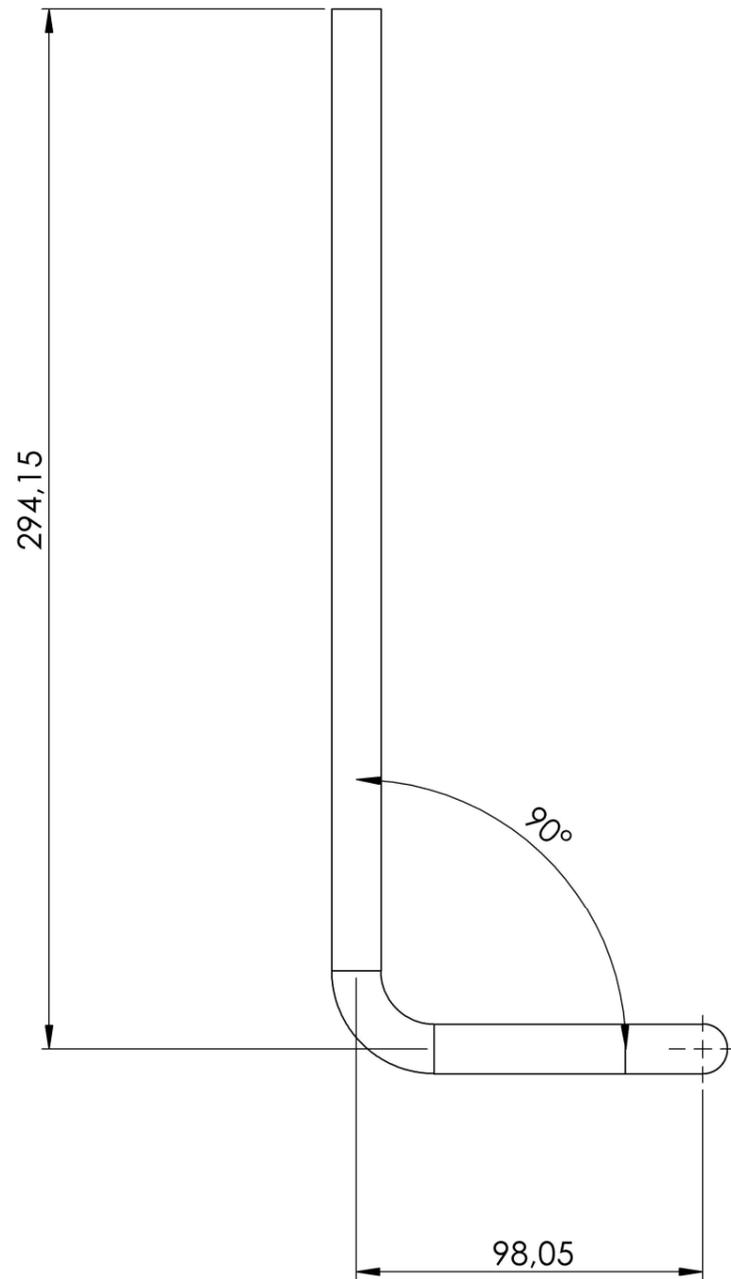


Raccordi non quotati R 22

UNI EN 22768-mK

0.5x45°

# <b>1</b>	MATERIAL <b>Lega 6060 T6</b>	STUDENT <b>Ignazio Pappadà</b>	Build 01/12/2019 01:46:40
SUBJECT <b>Componenti Esoscheletro</b>		COURSE <b>Tesi Magistrale-Ing.Meccanica</b>	SCALE 1:5
DESCRIPTION Leg-link_dx			DATE 06/12/2019
 <b>Politecnico di Torino</b>	SURFACE TEXTURE (   )	WEIGHT (Kg)	
	PAPER A3 1/1	Drawing N.	
Politecnico di Torino - Corso Duca degli Abruzzi, 24 - 10129 TORINO			

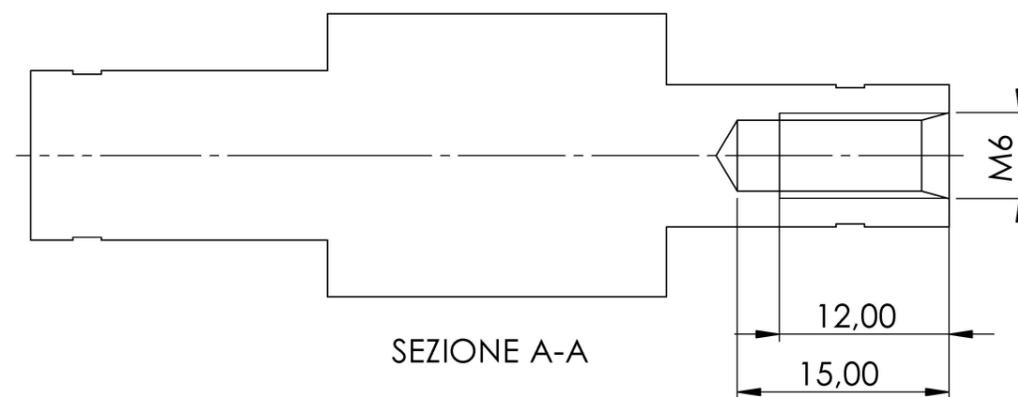
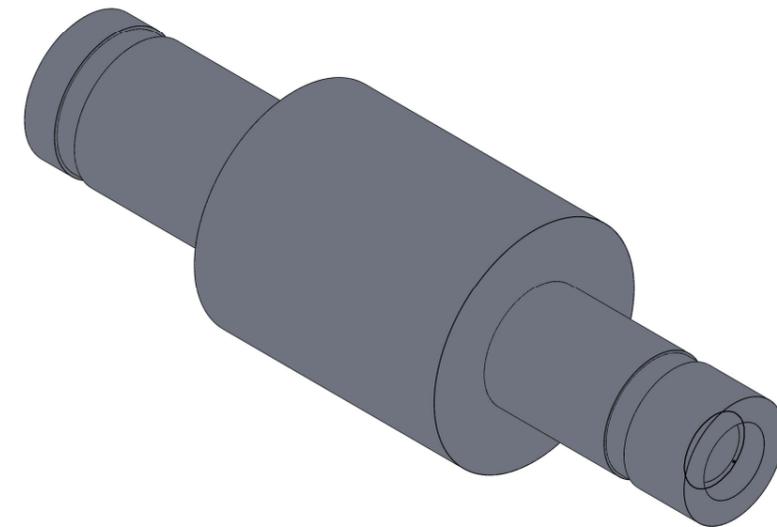
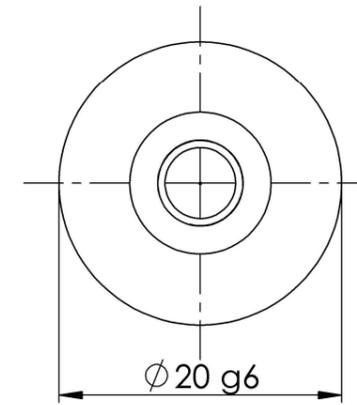
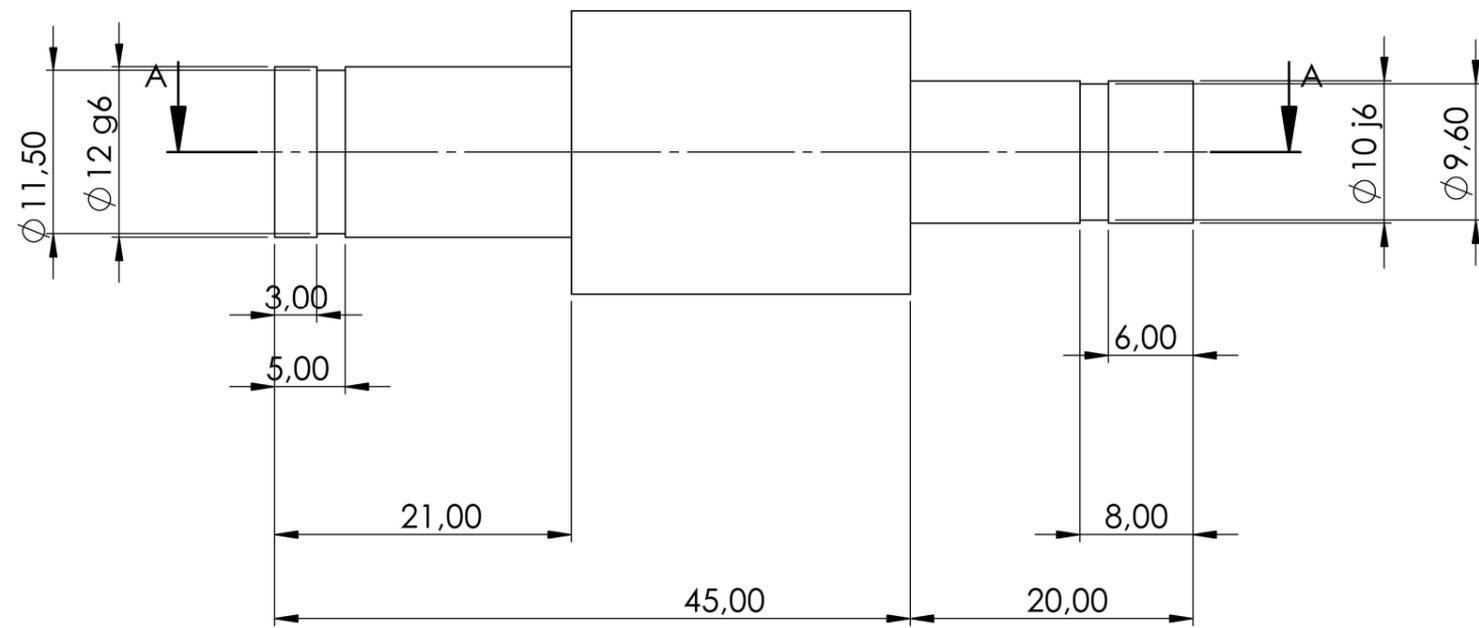


Raccordi non quotati R 22

UNI EN 22768-mK

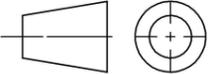
0.5x45°

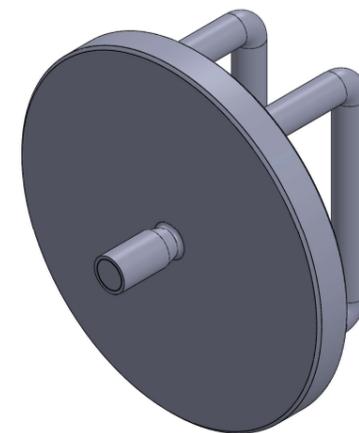
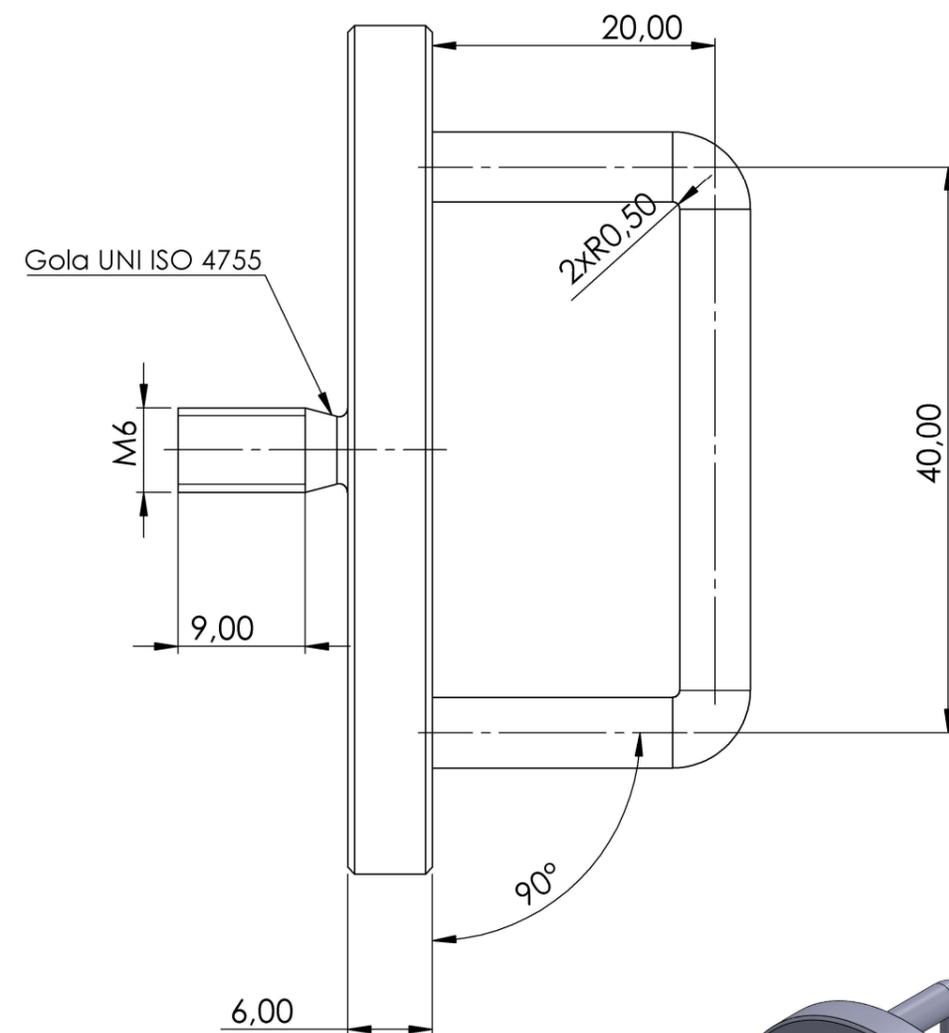
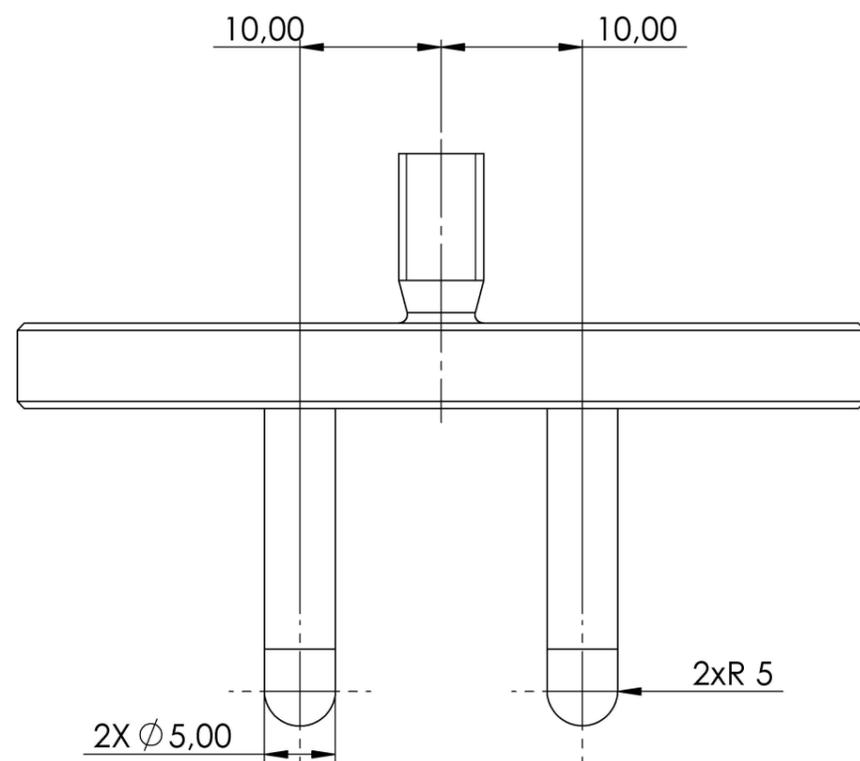
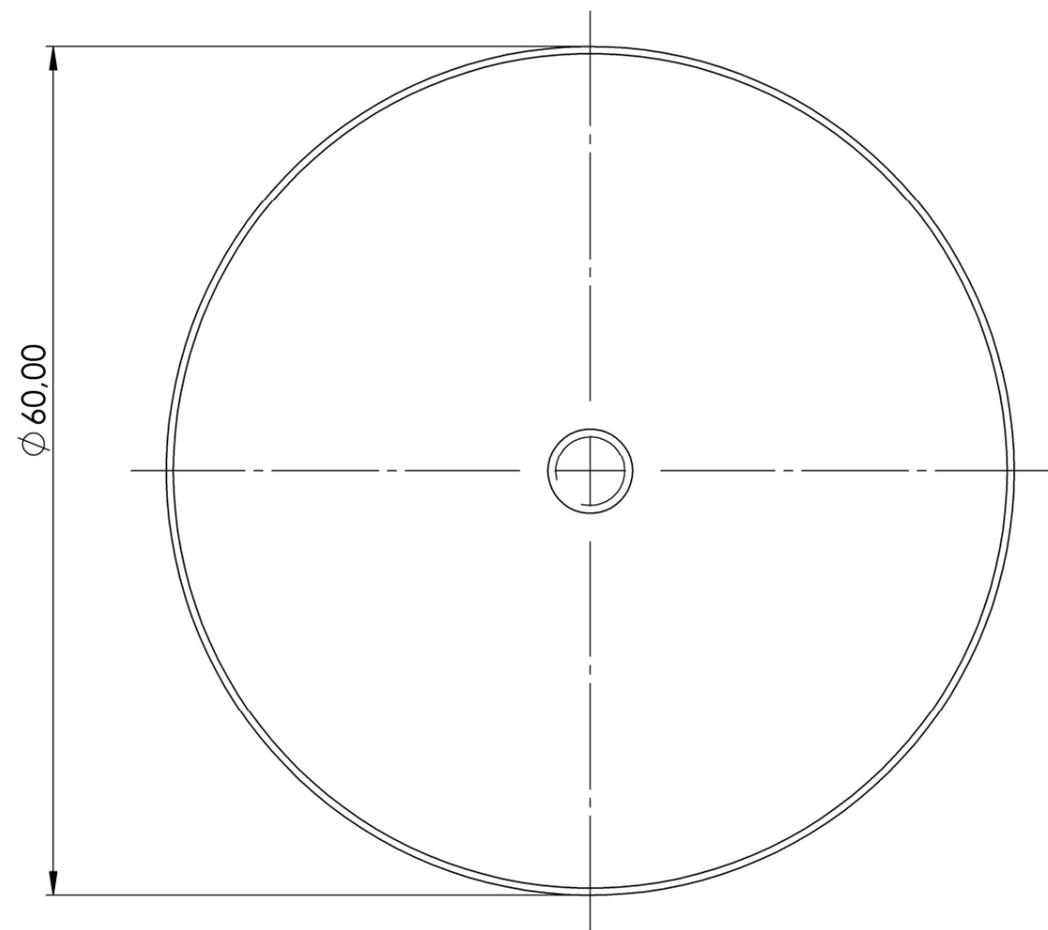
# 1	MATERIAL <b>Lega 6060 T6</b>	STUDENT <b>Ignazio Pappadà</b>	Build 01/12/2019 01:46:40
SUBJECT <b>Componenti Esoscheletro</b>	DESCRIPTION Leg-link	COURSE <b>Tesi Magistrale-Ing.Meccanica</b>	SCALE 1:5
			DATE 06/12/2019
 <b>Politecnico di Torino</b>		SURFACE TEXTURE (  )	WEIGHT (Kg)
Politecnico di Torino - Corso Duca degli Abruzzi, 24 - 10129 TORINO		PAPER A3 1/1	Drawing N.



UNI EN 22768-mK

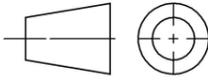
0.5x45°

#	<b>2</b>	MATERIAL <b>Lega 2011 T8</b>	STUDENT <b>Ignazio Pappadà</b>	Build 15/09/2019 12:21:46
SUBJECT	<b>Componenti per Esoscheletro</b>		COURSE <b>Tesi Magistrale-Ing. Meccanica</b>	SCALE <b>2:1</b>
DESCRIPTION	Perno_2		DATE 08/12/2019	
 <b>Politecnico di Torino</b>		SURFACE TEXTURE 	WEIGHT (Kg)	
		PAPER <b>A3 1/1</b>	Drawing N.	
Politecnico di Torino - Corso Duca degli Abruzzi, 24 - 10129 TORINO				



UNI EN 22768-mK

0.5x45°

# 2	MATERIAL	STUDENT <b>Ignazio Pappadà</b>	Build 07/12/2019 01:59:18
SUBJECT <b>Componente Esoscheletro</b>		COURSE <b>Tesi Magistrale-Ing.Meccanica</b>	SCALE 2:1
DESCRIPTION piastra di chiusura			DATE 07/12/2019
 <b>Politecnico di Torino</b>	SURFACE TEXTURE (  )	WEIGHT (Kg)	
	PAPER A3 1/1	Drawing N.	
Politecnico di Torino - Corso Duca degli Abruzzi, 24 - 10129 TORINO			