

POLITECNICO DI TORINO

---

Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea

# Dimensionamento di un braccio robotico a 6 assi

Progetto Rover Trinity - Team DIANA



**Relatore**

Prof. Stefano Pastorelli

**Laureando**

Luigi DI RADO

Matricola: 204427

---

ANNO ACCADEMICO 2019 – 2020

# Ringraziamenti

# Indice

<b>1 Rover Esplorativi e di Assistenza: Scenari di missione</b>	5
1.1 Dall'esplorazione robotica all'assistenza di equipaggi . . . . .	6
1.2 Rover Challenge Series: regolamento e requisiti nelle competizioni tra Rover	7
1.3 Scenari affrontati nelle competizioni e ruolo di un manipolatore robotico . . . . .	7
1.3.1 Manutenzione . . . . .	8
1.3.2 Raccolta di campioni scientifici . . . . .	8
1.3.3 Scenario Fetch and Collect . . . . .	9
<b>2 Design di un manipolatore a 6 gradi di libertà</b>	13
2.1 Analisi preliminare dei requisiti . . . . .	13
2.2 Gradi di libertà necessari . . . . .	14
2.3 Workspace necessario . . . . .	16
2.4 Struttura del robot . . . . .	17
2.5 Descrizione del modello di Robot . . . . .	18
2.6 Modello multibody . . . . .	19
<b>3 Attuatori per un progetto di robotica low-cost</b>	23
3.1 Motoriduttori Passo-Passo, trasmissione del Moto e componenti utilizzati . . . . .	23
3.1.1 Joint 1 . . . . .	24
3.1.2 Joint 2 . . . . .	27
3.2 Attuatori Lineari, Cinematismo Joint 3 . . . . .	29
3.3 Servomotori digitali: Dynamixel MX-106 . . . . .	31
<b>4 Polso sferico, design e scelte progettuali</b>	33
4.1 Descrizione . . . . .	33
4.2 Studio del materiale da stampa ABSPlus P430 . . . . .	34
4.3 Integrazione e requisiti progettuali . . . . .	36
4.4 Scelta dei Cuscinetti . . . . .	37
4.5 Riduzione del numero minimo di denti: ingranamento elicoidale . . . . .	37
4.6 Dimensionamento della trasmissione . . . . .	39
4.6.1 Metodo di Lewis . . . . .	39
4.6.2 Contatto Hertziano . . . . .	40
4.6.3 Codice di calcolo . . . . .	40
4.6.4 Risultati Joint 4 . . . . .	41
4.6.5 Risultati Joint 5 . . . . .	44

4.6.6	Risultati Joint 6 . . . . .	46
4.6.7	Disegno di ruote dentate elicoidali prodotte in FDM . . . . .	47
<b>5</b>	<b>Costruzione mediante manifattura additiva e assemblaggio</b>	49
5.1	Produzione dei componenti . . . . .	49
5.2	Analisi dei costi . . . . .	50
5.3	Assemblaggio . . . . .	51
<b>6</b>	<b>Risultati attesi ed ottenuti dal Robot realizzato</b>	55
6.1	Test e collaudo del Robot assemblato . . . . .	55
6.2	Carichi massimi applicati e precisione ottenuta . . . . .	55
6.3	Risultati nelle Competizioni studentesche . . . . .	55
<b>Disegni ed elaborati tecnici</b>		57
<b>Bibliografia</b>		58

# Capitolo 1

## Rover Esplorativi e di Assistenza: Scenari di missione

Il team DIANA, acronimo di *Ducti Ingenio Accipimus Naturam Astrorum*, lavora nella ricerca e nello sviluppo della robotica per applicazioni spaziali.

Il Team è stato fondato nel 2008 in occasione del progetto nazionale AMALIA e ha prodotto tre prototipi di rover: **Amalia**, un rover lunare esplorativo, **T0-R0**, un rover marziano di assistenza che ha partecipato a European Rover Challenge 2018 e **TRINITY**, il nuovo rover marziano che ha partecipato all'European Rover Challenge 2019.

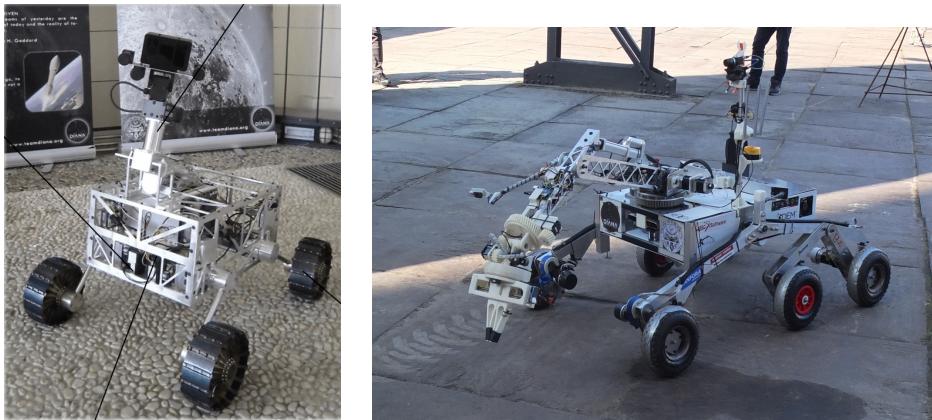


Figura 1.1. Rover AMALIA E T0-R0

Il team DIANA ha un'esperienza decennale nella progettazione e nello sviluppo di modelli di rover per l'esplorazione e l'assistenza e dispone di un set completo di abilità ingegneristiche, ottima conoscenza del software ed eccezionali capacità organizzative, gestionali e di lavoro di squadra, tutte cruciali nella produzione di un progetto complesso. Il team intende porre le basi per un nuovo approccio all'ingegneria aerospaziale, contribuendo a portare la robotica spaziale a un livello più accessibile grazie alla sua tecnica di lavoro innovativa.

TRINITY è il prodotto del patrimonio e della competenza di dieci anni di duro lavoro e ricerca approfondita, condotta con una visione chiara e un approccio specifico.

Il team sta affrontando una crescita dal 2018 e la partecipazione all’European Rover Challenge ha avuto un ruolo chiave nel suo sviluppo poiché rappresenta un’opportunità senza precedenti per testare le soluzioni del team e capire dove e come migliorare il suo progetto.



Figura 1.2. Il Team DIANA con TRINITY ad ERC 2019

Nell’ambito del team DIANA che sta diventando un forte gruppo di giovani ingegneri che lavorano nella ricerca e nello sviluppo della robotica spaziale, testare il lavoro svolto in laboratorio è un passo cruciale nello sviluppo.

Inoltre, il Team DIANA ha vissuto l’European Rover Challenge come un evento eccezionale, in grado di riunire ingegneri appassionati e qualificati in un ambiente internazionale.

Pertanto, per essere una fonte di competenza, un campo per i test e un’opportunità senza precedenti di crescita e raccolta, la partecipazione all’European Rover Challenge 2019 è senza dubbio un’esperienza necessaria e profondamente desiderata per il Team DIANA.

## 1.1 Dall’esplorazione robotica all’assistenza di equipaggi

I Rover di assistenza progettati dal Team DIANA rappresentano dei modelli di future missioni dove i Rover vengono impiegati nell’assistenza ad un equipaggio umano.

Viene a cadere il presupposto per cui le sonde esplorative operano in scenari unmanned e il ruolo dell’operatore diventa centrale nella progettazione del Robot.

Esso dovrà avere quanto più possibile un funzionamento autonomo per non sottrarre risorse all’utilizzatore, considerare la presenza di esseri umani nel suo workspace e portare a termine mansioni in ambienti rischiosi per l’essere umano.

## 1.2 Rover Challenge Series: regolamento e requisiti nelle competizioni tra Rover

Le Rover Challenge Series Competitions a cui il Team DIANA rivolge il suo interesse sono competizioni dedicate a studenti dell'area di Ingegneria che mirano a testare i progetti di Rover in uno scenario che simula le mansioni di un Rover di Assistenza.

Si stimola la costituzione di team multidisciplinari che vanno a realizzare un prototipo per competere, corredata da una completa reportistica ispirata alla metodologie attuate nelle principali agenzie spaziali e della documentazione video.

Viene inoltre richiesta la gestione del team attraverso strumenti di project management e la gestione finanziaria di stampo aziendale.



Figura 1.3. Terreno marziano a European Rover Challenge 2019

## 1.3 Scenari affrontati nelle competizioni e ruolo di un manipolatore robotico

Le competizioni si svolgono su un terreno accidentato, realizzato da esperti di terrameccanica che vanno a simulare il più possibile uno scenario marziano.

Le task vengono svolte in un tempo limitato con il Robot teleoperato e gli operatori sono isolati dalla vista diretta all'interno di una control room.

L'unica task che non coinvolge l'uso del manipolatore robotico è quella di **Navigazione autonoma** che non tratteremo. Pertanto segue l'analisi degli scenari di utilizzo.

### 1.3.1 Manutenzione

La maintenance task come definita dal regolamento *ERC 2019 Student Rules* [1]

*The maintenance task is intended to demonstrate rovers and teams ability and performance in operating electrical panel on which several switches and other electrical components are mounted.*

*The Team has to use rover's manipulating device to set switches to correct positions, measure electrical parameters, set other panel controls and observe device feedback.*

**Successione di operazioni da svolgere :**

1. MAIN switch set to ON position as first;
2. Group 1 and Group 2 switches set up to requested positions;
3. knob set up to requested position
4. voltage measurement reported to the judge
5. High-power plug inserted into the sock
6. No panel damage events occurred (control elements, connectors, covers, foils)
7. task automation efforts and results presented to the judge.

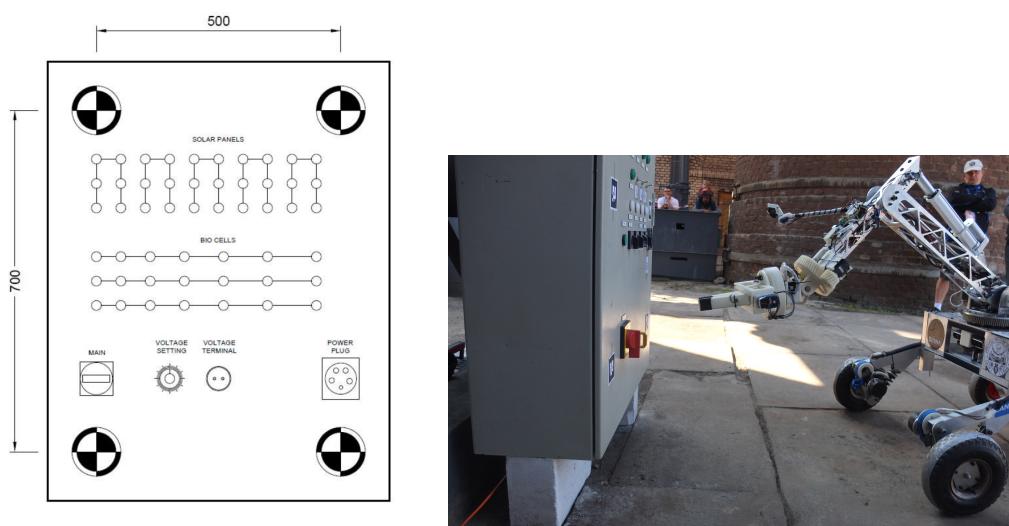


Figura 1.4. Pannello Elettrico e Rover durante la Task

### 1.3.2 Raccolta di campioni scientifici

Per qualsiasi missione scientifica o di esplorazione, il rover deve essere in grado di fornire misurazioni di campioni di proprietà del suolo da diversi strati geologici.

In generale, i campioni prelevati da strati più profondi sono più preziosi a causa delle condizioni atmosferiche sulla superficie dei corpi (gli effetti degli agenti atmosferici spaziali compaiono anche su corpi senza atmosfera dovuti ad esempio alle radiazioni solari).

Lo scopo della task è quello di ottenere campioni di strati superficiali e sotterranei del suolo, ciascuno prelevato da diverse posizioni specificate dal giudice.

I campioni devono essere conservati nella cache in contenitori preparati. Lo scenario operativo si svolge in questo modo :

- Raggiungere le aree di campionamento indicate dal giudice
- Raccogliere e collezionare nella cache 4 campioni geologici dal terreno
- 3 campioni di superficie da diverse posizioni,
- campione profondo (15-30 cm sotto la superficie);
- preparare la documentazione fotografica;
- Raccogliere diverse misurazioni di campioni o aree di campionamento che potrebbero essere utili per la scienza planetaria come ogni peso campione, volume e altri parametri;
- Scavare la trincea e documentare il risultato;
- Fornire campioni in contenitori sigillati.

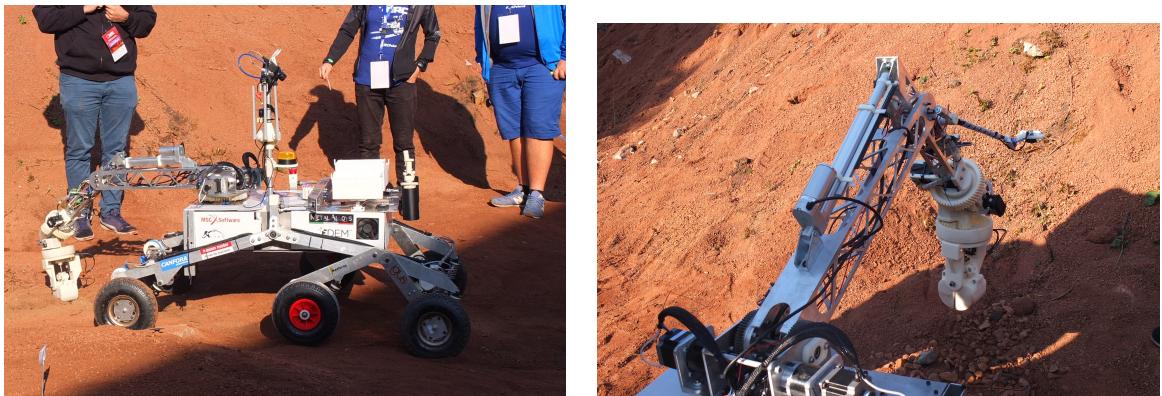


Figura 1.5. Rover T0R0 durante la task Scientifica

### 1.3.3 Scenario Fetch and Collect

La Mars Sample Return Mission dovrebbe essere una missione spaziale per raccogliere campioni di roccia e polvere da Marte e riportarli sulla Terra per analisi. In questo scenario il rover scientifico lascia a terra campioni sigillati nella cache segnalando la posizione e

continua il suo lavoro.

Quindi, un altro rover (caratterizzato da una migliore mobilità e generalmente più veloce) ha la responsabilità di raccoglierli e consegnarli in una posizione specifica.

Quindi il sistema deve essere pronto a cercare e identificare la cache. Inoltre, il controllo a terra nel ciclo delle operazioni SFR può rallentare la missione, quindi è altamente desiderato automatizzare il più possibile gli elementi della missione.

Inoltre, alcune missioni specifiche come il ritorno a terra del campione specificano requisiti extra sulla progettazione del contenitore che dovrebbero essere utilizzati per la raccolta dei campioni.

Questa attività ha lo scopo di dimostrare la capacità di eseguire lo scenario di recupero della cache. Il team deve raggiungere le posizioni contrassegnate sulla mappa, cercare e raccogliere la cache e posizionarla nel container a bordo con l'orientamento richiesto, quindi consegnare il container con cache alla destinazione finale.

La task si svolge così:

- Raccogli 3 cache da posizioni diverse
- Raggiungi l'area in cui è stata rilasciata la cache;
- Cerca una cache
- Avvicinati alla cache, scatta una foto e raccoglila
- Posizionare la cache nel contenitore a bordo
- Consegnare il contenitore con le catture nel luogo designato
- Collocare l'intero contenitore con le cache all'interno nel punto contrassegnato

Risultati attesi :

- Dimostrazione di apparecchiature di manipolazione del rover (un braccio robotico o equivalente) e le prestazioni dell'operatore nel controllo remoto;
- Dimostrazione delle capacità di automazione del sistema;
- Posizionamento delle cache in una posizione corretta nel contenitore;
- consegna del container alla destinazione finale;



Figura 1.6. Il rover T0R0 raccoglie una cache sotto esame della giuria

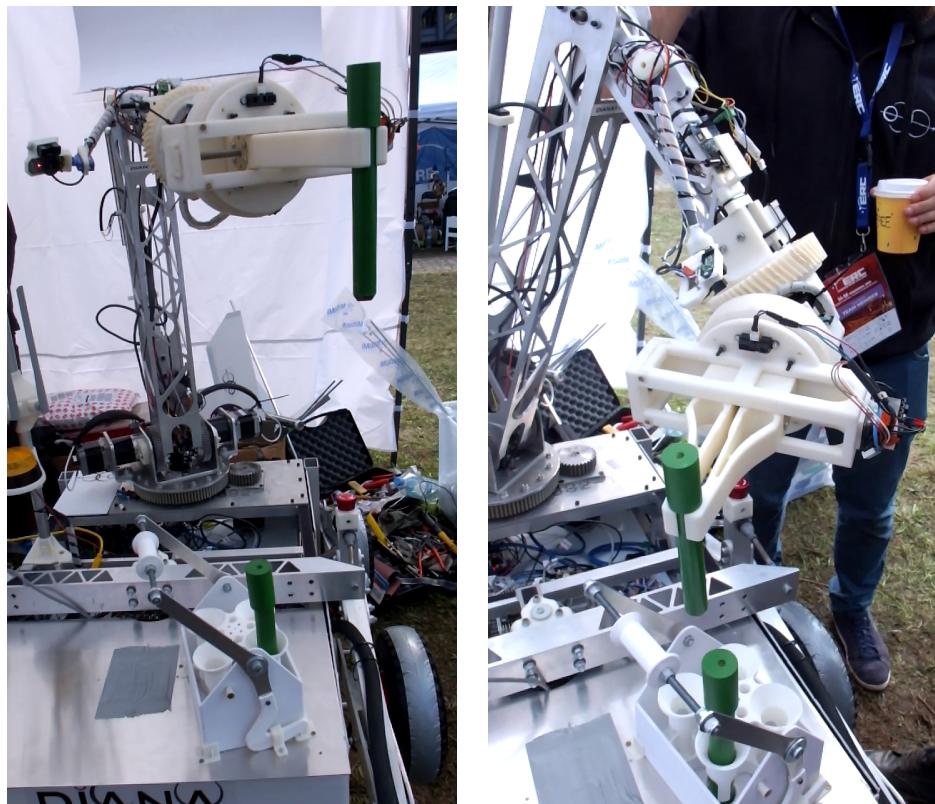


Figura 1.7. Manipolazione della cache, si evidenzia l'abilità di orientamento nello spazio del polso sferico



## Capitolo 2

# Design di un manipolatore a 6 gradi di libertà

### 2.1 Analisi preliminare dei requisiti

Ogni progetto di applicazione aerospaziale, come quello svolto per il Rover Trinity, parte dall'analisi dei requisiti di progetto e dalla formalizzazione dei requisiti in maniera codificata.

La tracciabilità dei requisiti, analizzati a partire da uno scenario di missione e dalla vigente normativa è fondamentale all'interno di un progetto aerospaziale perchè consente di semplificare gli sviluppi futuri.

La costituzione di un database di requisiti, lezioni apprese e errori commessi nel caso in cui i requisiti vengano disattesi consente di abbattere i costi e le tempistiche di sviluppo di progetti futuri evitando la ripetizione di esperimenti ed errori commessi in passato.

ORIG.	REQUISITO	SOLUZIONE TECNICA	VALIDAZIONE
ERC	Il sottosistema braccio deve essere in grado di raggiungere il terreno, raggiungere tutta la superficie dello chassis del rover, raggiungere 1.5 metri di altezza, manipolare elementi nello spazio tridimensionale	Manipolatore robotico antromorfo a 6 assi: dalla letteratura è la soluzione con la maggior destrezza	Modellazione CAD assieme allo chassis del Rover, Script di calcolo del workspace, modello multibody

ERC	Il Sottosistema braccio deve essere in grado di sollevare almeno un payload di 5kg	Robot attuato da motoriduttori passo-passo, attuatori lineari e servomotori ad elevata coppia Trasmissione mediante riduttore a ruote dentate	CAD design del braccio, Matlab script del workspace, modello multibody, modello FEM, teoria di Lewis
MISSION	Il braccio deve avere elevata velocità operativa senza sacrificare l'accuratezza (target of tool center point of $1cm^2$ )	Controllo in microstep dei motori passo passo, encoder relativo per attuatore lineare controllo in posizione dei servomotori	Modello Simulink e cinematica inversa
MISSION	Il braccio deve essere in grado di raggiungere il pannello manutenzione posizionato a 0.5m di distanza con il tool center point perpendicolare	Polso Sferico	CAD design, Matlab script, multibody model

Tabella 2.1: Tabella dei requisiti derivati dal progetto e dal regolamento

## 2.2 Gradi di libertà necessari

Il robot antropomorfo debutta in campo industriale all'inizio degli anni Settanta con l'obiettivo di sostituire l'uomo in alcuni passaggi della catena di montaggio che prevedono lo svolgimento di attività usuranti e pericolose.

La struttura meccanica dei robot è costituita da una sequenza di elementi meccanici connessi tra loro da giunti che ne consentono il moto relativo.

I singoli elementi possono essere connessi tra loro in serie od in parallelo.

La struttura è seriale quando i singoli elementi sono collegati l'uno all'altro come gli anelli di una catena; è parallela quando tutti gli elementi sono collegati sia a terra sia all'estremità della struttura tramite dei giunti rotoidali. L'approccio seriale garantisce una più ampia possibilità di movimento, mentre quello parallelo permette di ottenere una maggiore rigidità.

Un arbitrario spostamento di un corpo rigido può essere ottenuto componendo dei singoli spostamenti fondamentali; ognuno di essi rappresenta un grado di libertà per l'oggetto.

I robot industriali, a cui si inspira il progetto, hanno fondamentalmente lo scopo di manipolare degli oggetti, cioè di muoverli nello spazio controllandone posizione ed orientamento.

Gli oggetti che i robot si trovano a dover manipolare sono, nella quasi totalità dei casi,

riconducibili a corpi solidi.

Si tratterà quindi di studiarne i possibili movimenti nello spazio per poi definire quelle caratteristiche che la struttura deve possedere per poterli realizzare.

Infatti l'oggetto, una volta afferrato, è solidale con l'estremità della struttura e quindi ne riproduce fedelmente gli spostamenti.

Un corpo rigido ha, nello spazio, sei gradi di libertà corrispondenti ad altrettante possibilità di spostamento. Ciò significa che la sua posizione e il suo orientamento rispetto ad un sistema di riferimento sono descritte da sei parametri.

Per rendere più intuitiva questa affermazione si immagini di rendere solidale con l'oggetto rigido la terna cartesiana xyz in figura 2.1.

I sei parametri prima citati risultano ora di facile interpretazione: tre definiscono la posizione dell'origine della terna xyz mentre le rimanenti ne individuano l'orientazione. Gli spostamenti corrispondenti sono tre traslazioni (parallelamente agli assi coordinati) e tre rotazioni (attorno agli stessi assi).

Questo permette di affermare che la struttura di un robot, per poter muovere ed orientare arbitrariamente un corpo nello spazio, ha bisogno di un minimo di sei gradi di libertà.

Con analoghe considerazioni è facile arrivare a concludere che un corpo rigido, se vincolato a muoversi in un piano, ha tre gradi di libertà.

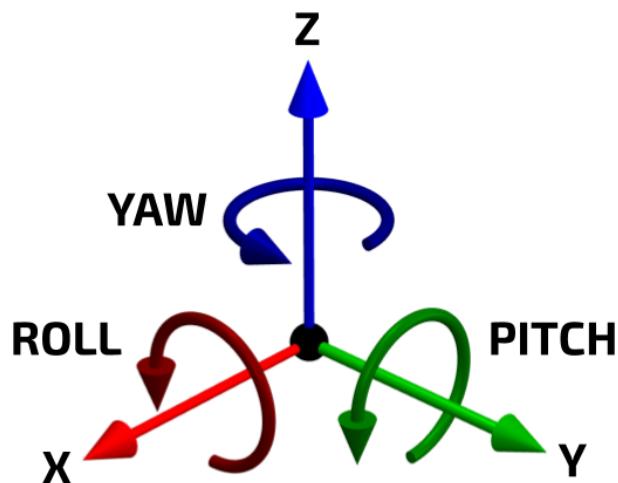


Figura 2.1. 6 gradi di libertà di un corpo rigido nello spazio

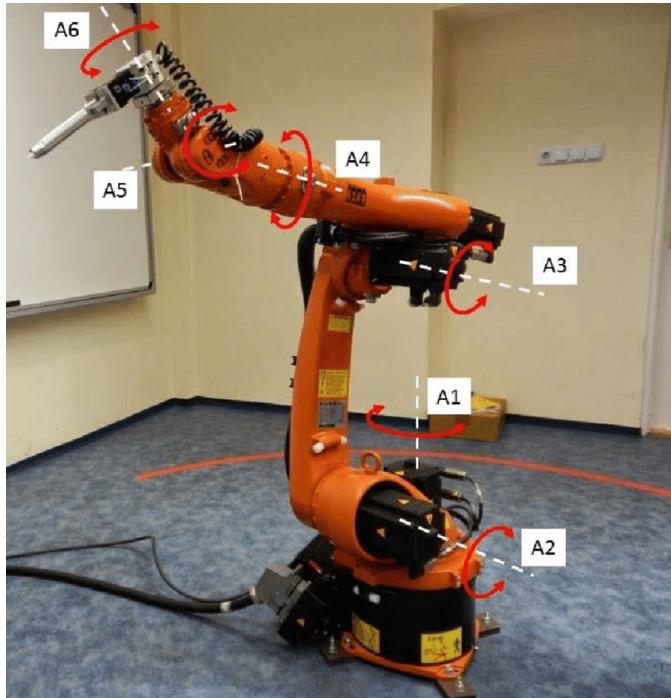


Figura 2.2. Un robot industriale antropomorfo a 6 assi

### 2.3 Workspace necessario

Questi robot come quello in figura 2.2 sono detti antropomorfi in quanto riproducono abbastanza fedelmente le possibilità di movimento di un braccio umano o a giunti rotoidali verticali (in quanto il secondo e il terzo grado di libertà, detti rispettivamente spalla e gomito, muovono il braccio del robot all'interno di un piano verticale).

Il volume di lavoro può essere considerato, in prima approssimazione, come una porzione di sfera. Il workspace richiesto per il manipolatore deriva dalle richieste del regolamento e dallo scenario operativo. Si può riassumere nella necessità di raggiungere un'altezza di 1,5 metri e quella del suolo e operare sullo chassis del rover per depositare oggetti e campioni. Il workspace è stato valutato attraverso un semplice calcolo iterativo di cinematica diretta dove la struttura era parametrizzata attraverso le lunghezze dei link. L'obiettivo è quello di realizzare uno spazio di lavoro sufficiente piazzando la posizione dell'Tool Center Point per ogni iterazione in una vista laterale.

Una volta decise delle lunghezze dei link principali è stato possibile iniziare la costruzione dei primi modelli cad della struttura del robot per poterne costruire un modello dinamico e non solo più cinematico.

L'abilità di raggiungere facilmente delle posizioni comunque collocate rispetto al basamento mostra come il robot possa scendere al di sotto della quota della base, estendersi verso l'alto e infine prelevare dei pezzi alle sue spalle con una semplice rotazione attorno al primo grado di libertà.

Molte applicazioni pratiche non richiedono necessariamente tutte queste possibilità ma, in

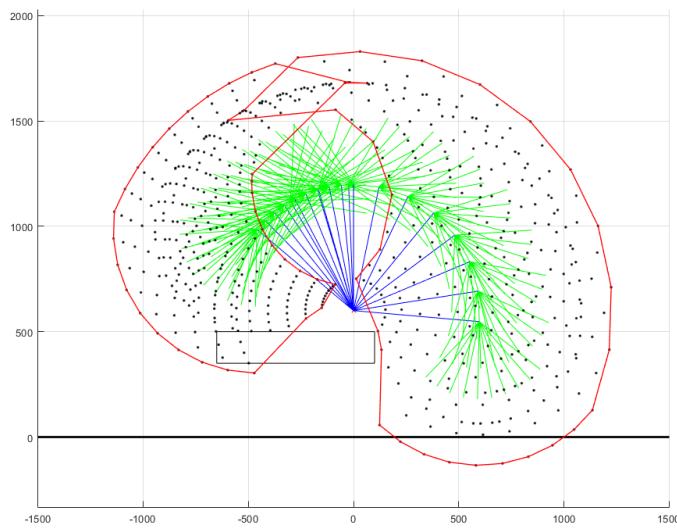


Figura 2.3. Workspace in vista laterale, è rappresentato il piano dello chassis e i punti raggiunti dal TCP

generale, si può dire che tutto quello che gli altri robot possono fare, può essere fatto più facilmente da un robot antropomorfo.

## 2.4 Struttura del robot

L'estremità della struttura di un robot possiede in genere sei diverse possibilità di movimento: tre di traslazione per spostamenti nello spazio e tre di rotazione per l'orientazione. Questa divisione dei gradi di libertà in due gruppi con finalità distinte si riflette generalmente nella struttura con una specializzazione dei giunti.

I gradi di libertà principali si occupano di posizionare nello spazio gli oggetti manipolati dal robot, quelli secondari di orientarli. Quelli principali formano il braccio del robot mentre quelli secondari il polso. Braccio e polso, in conseguenza della loro funzione, presentano caratteristiche diverse.

In primo luogo nella realizzazione del braccio si può scegliere se utilizzare giunti rotoidali o prismatici mentre la realizzazione del polso può avvenire solo con i giunti del primo tipo. Inoltre gli elementi meccanici che compongono il braccio hanno una certa lunghezza mentre quelli del polso sono in genere privi di dimensione, nel senso che gli assi di rotazione dei tre giunti si incontrano in un punto.

## 2.5 Descrizione del modello di Robot

La configurazione scelta è quella di un manipolatore antropomorfo a 6 assi. La struttura per i primi tre assi è realizzata tramite link in profilati di alluminio estrusi e parti lavorate sempre in alluminio mentre le cerniere sono realizzate da alberi in acciaio supportati da boccole a basso coefficiente di attrito.

I rimanenti tre assi sono collocati nel Polso Sferico all'estremità, un componente in manifattura additiva che verrà trattato più ampiamente in seguito.

Il polso è costituito da un insieme di non più di tre giunti rotoidali realizzati alla scopo di permettere l'orientazione dell'utensile di manipolazione del robot.

Sarebbe molto interessante che i tre assi, attorno a cui avvengono le rotazioni, si incontrino in un ben determinato punto del pezzo manipolato, così che l'operazione di orientamento non vada a modificare la sua posizione nello spazio di lavoro.

Si pensi, come esempio, ad un robot utilizzato in un'applicazione di avvitatura, il cui polso sia realizzato in modo tale che i tre assi di rotazione si incontrino esattamente sopra il giravite.

Ciò significa che la vite può essere comunque orientata, ad esempio per mantenerla perpendicolare alla superficie del pezzo che ospita il foro filettato, senza che questo vari la sua posizione nello spazio che risulterebbe governata soltanto dai giunti principali.

Poichè è molto difficile realizzare in pratica un polso di questo tipo, quelli dei robot industriali e quello realizzato per manipolatore del rover TRINITY hanno il punto di incontro degli assi di rotazione contenuto all'interno del polso stesso.



Figura 2.4. Render del modello CAD preliminare del robot

Il robot è schematizzato nel disegno 2.5 e nel capitolo 3 verrà analizzato il dimensionamento degli *attuatori Stepper* e dell'*Attuatore Lineare* mentre al **Polso Sferico** sarà dedicato il capitolo 4.

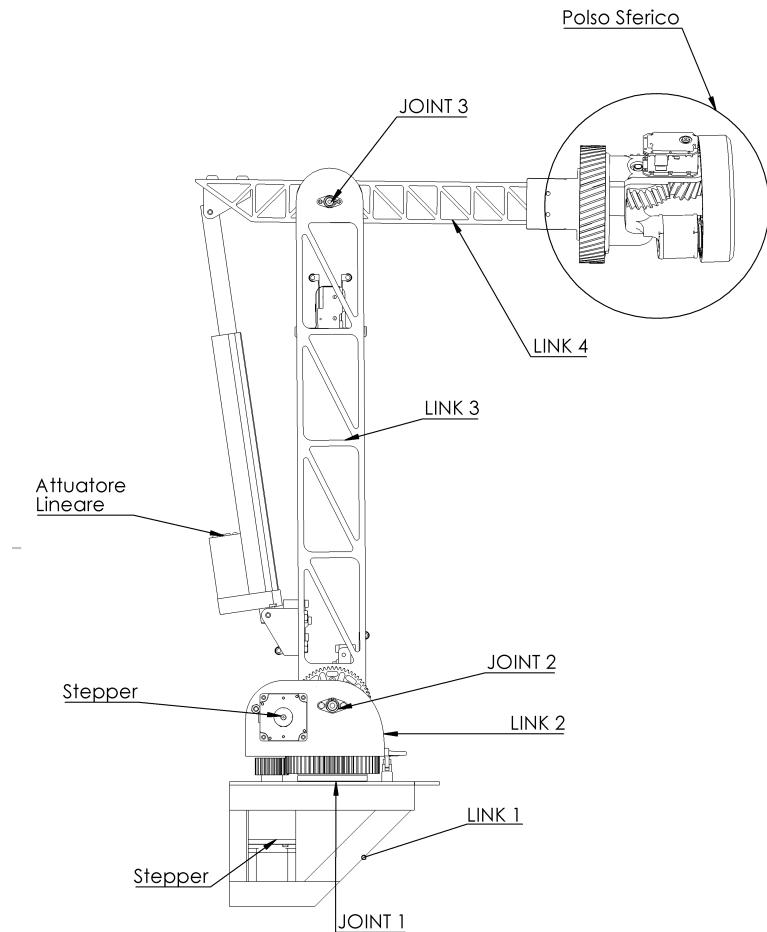


Figura 2.5. Schema delle componenti

## 2.6 Modello multibody

La costruzione di un modello multibody del robot è fondamentale per avere uno strumento di analisi delle prestazioni richieste agli attuatori e poter selezionare dei componenti adatti sul mercato. Per l'analisi della dinamica del robot è stato costruito un modello multibody attraverso il software *MSC Adams*.

Un sistema dinamico multibody consiste di corpi solidi connessi tra loro tramite giunti che ne limitano o impongono il relativo movimento. Lo studio della dinamica multibody è l'analisi di come questi sistemi si muovono sotto l'influenza di specifiche forze, detta anche dinamica diretta. Lo studio del problema opposto, cioè di quali forze sono necessarie a far muovere il sistema meccanico in un modo specifico è detta dinamica inversa.

La possibilità di studio della dinamica inversa ha permesso di studiare le prestazioni richieste agli attuatori del robot e dimensionare di conseguenza i componenti meccanici della trasmissione. Eseguita la simulazione è possibile raccogliere le misure richieste e processare

i dati raccolti nello strumento di raccolta dati *Adams/PostProcessor*.

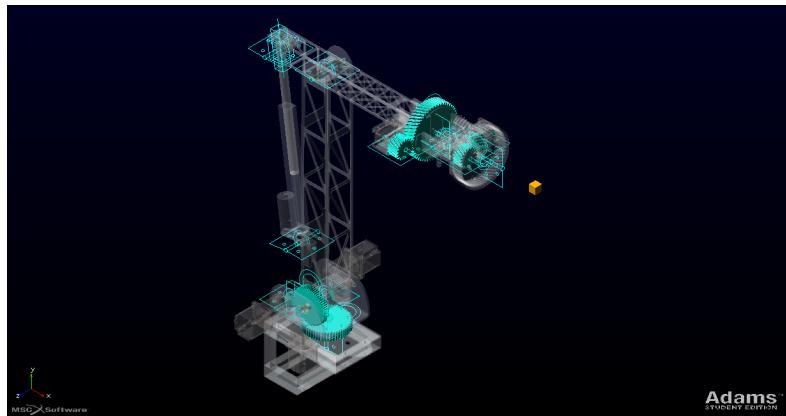


Figura 2.6. Modello del Robot in ambiente Adams, in ciano le icone dei giunti e le trasmissioni mediante ruote dentate

Il modello del robot 2.6 è stato costruito a partire dal modello CAD preliminare 2.4 modellato in ambiente *SolidWorks* importato nello spazio di lavoro di *Adams/View*. I singoli componenti sono stati dotati delle relative matrici di inerzia riferite a un sistema di riferimento favorevole al calcolo dall'output di proprietà di massa del CAD e riferite ad un analogo *Marker* del modello di simulazione. Così facendo la simulazione permetterà di calcolare le forze necessarie affinchè si rispettino le leggi di moto imposte ai giunti. Inoltre il modulo *Adams/Machinery* consente di model-

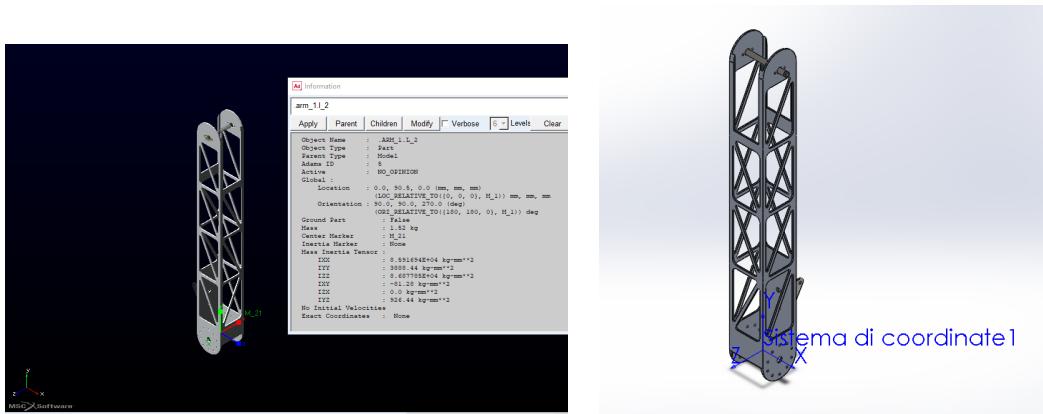


Figura 2.7. Proprietà inerziali del componente e sistema di coordinate nel CAD

lare trasmissioni mediante accoppiamento di ruote dentate e di simularne il comportamento con vari livelli di approssimazione. Nella fattispecie si è scelto l'approccio semplificato che studia il problema di contatto mediante metodo analitico monodimensionale, in modo da fornire un confronto e una verifica del dimensionamento realizzato.

## Capitolo 3

# Attuatori per un progetto di robotica low-cost

Il progetto dei Rover che partecipano alle Rover Challenge Series competitions è caratterizzato da un vincolo di costo molto importante.

Difatti nella gara progettuale è posto un limite di costo per l'intero progetto che varia da competizione a competizione e dove non ci fosse un limite esplicito è sicuramente premiata l'economia e l'utilizzo di componenti standard già disponibili sul mercato.

Questo vincolo si rivela molto importante nella scelta degli attuatori e relativa elettronica di controllo essendo i componenti più costosi di un progetto di questo tipo.

Per i giunti di posizionamento sono stati utilizzati motoriduttori passo-passo e un attuatore lineare mentre per i giunti del polso dei servomotori digitali per applicazioni robotiche.

### 3.1 Motoriduttori Passo-Passo, trasmissione del Motore e componenti utilizzati

I motoriduttori passo-passo scelti sono commercializzati dalla Phidgets ed offrono un potente e robusto attuatore a basso costo.

Hanno risoluzione angolare di  $0.023^\circ$  ed una coppia massima di 23 Nm, sono dotati di flangiatura standard NEMA-23 ed albero di uscita di diametro  $\phi 12$  con sede linguetta e anello elastico per accoppiare una ruota dentata. Il secondo alberino di uscita permette di ospitare un encoder ottico per realizzare un controllo in posizione ad anello chiuso.

Il controllo dei motori passo-passo è molto semplice perché possibile ad anello aperto, attraverso un controllore specifico per la commutazione delle fasi ad onda quadra.

Il controllore scelto è il driver L6208 della STMicroelectronics, è un driver completamente integrato per motore passo-passo con protezione da sovraccorrente. Il dispositivo include tutti i circuiti necessari per pilotare un motore passo-passo bipolare bifase: un doppio ponte DMOS completo, il controller di corrente PWM a tempo di spegnimento costante che esegue la regolazione del taglio e della fase ed un generatore di sequenza, che genera il passo.

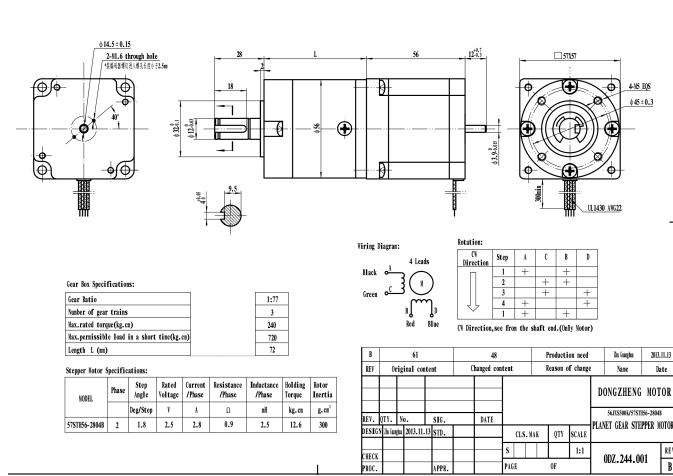


Figura 3.1. Scheda tecnica dell’attuatore 57STH56 NEMA-23

### 3.1.1 Joint 1

Per il Joint 1, su cui ruota tutta la struttura del robot nel piano orizzontale è necessario realizzare una base rigida su cui gravano il peso dell’intero robot e un importante momento quando il braccio è completamente steso e a sbalzo.

Perciò è stato impiegato un apposito giunto asso-radiale prodotto dalla IGUS, il *PRT-01-30* in figura 3.3.

La ralla IGUS è dotata di una corona esterna dentata di modulo unificato 2 e 54 denti perciò è stato possibile applicare un pignone prodotto da *MISUMI codice GEAKS2.0-18-20-B-12N* al motoriduttore con 18 denti per realizzare un rapporto di riduzione pari a 3. L’angolo di pressione è standard di 20° e la dentatura è a denti dritti.

Z1	Z2	Rapporto	a. pressione	a. elica	modulo	larghezza fascia	materiale
18	54	3	20°	0°	2	20 mm	C45

Si assume che la dentatura di modulo 2 in acciaio sia in grado di trasmettere la potenza prodotta dal motoriduttore con un ampio margine di sicurezza, pertanto non è stata dimensionata ma sono state solo verificate le forze scambiate dal modello multibody in figura 3.5.

Dal modello multibody sono state misurati due set di dati: quelli relativi alla ralla e quelli relativi all’attuazione.

In figura possiamo valutare la coppia richiesta all’attuatore dalla trasmissione con rapporto di riduzione 3 per realizzare una rotazione della base con il braccio in posizione distesa e ritratta, evidenziando l’impatto della posizione degli altri giunti di posizionamento sulla prestazione del motore.

Il modello tiene conto dell’attrito opposto dalla cerniera avendo inserito nel modello di simulazione il corretto valore di coefficiente di attrito dinamico fornito dalla produttrice IGUS pari a 0.2.

Dai dati raccolti si evince che nella condizione più sfavorevole in figura 3.4 ci si avvicina al valore di coppia massima prevista per l’attuatore con un valore di 20Nm senza comunque

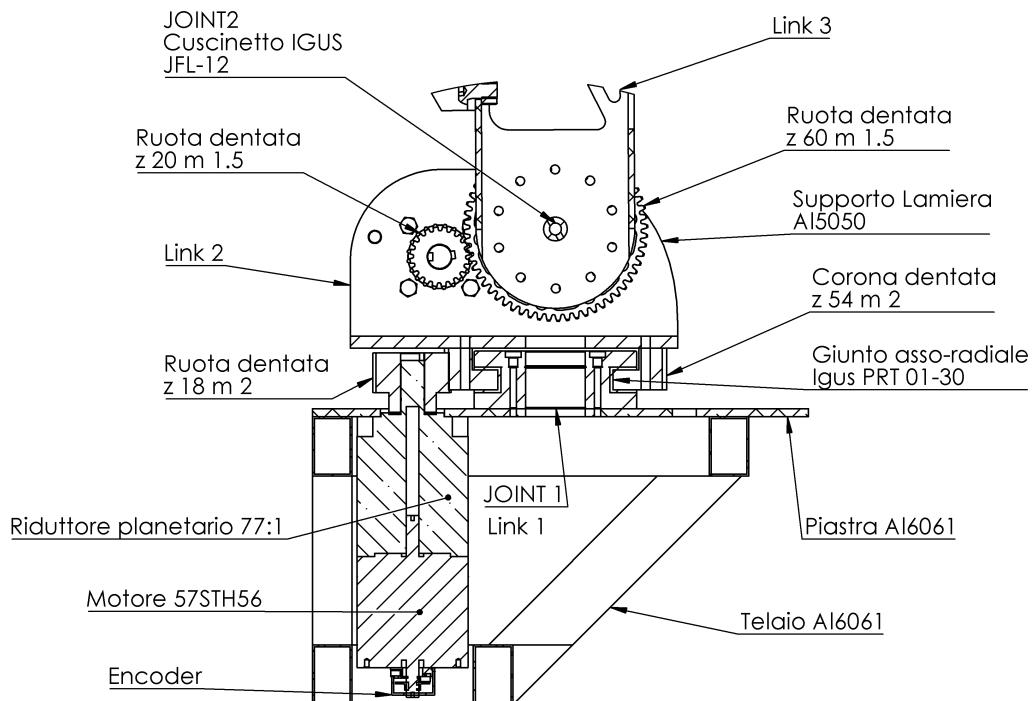


Figura 3.2. Schema della disposizione degli organi di trasmissione per i motori passo-passo

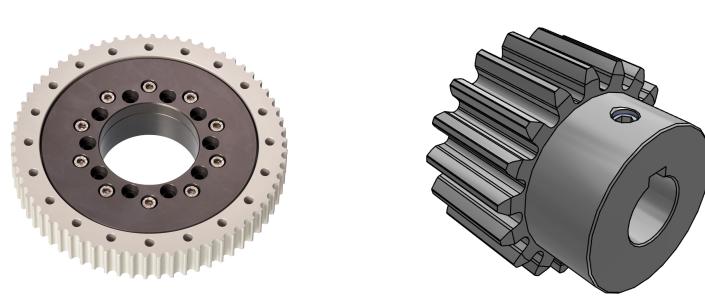


Figura 3.3. Ralla IGUS PRT 01-30 e pignone MISUMI GEAKS2.0-18-20-B-12N

superarla mentre nella condizione favorevole si è ben al di sotto con massimo di 12 Nm. Pertanto si prevede che l'attuatore sarà in grado di movimentare il carico senza che perda passi e quindi si crei uno shift tra la posizione attesa e quella effettivamente raggiunta.

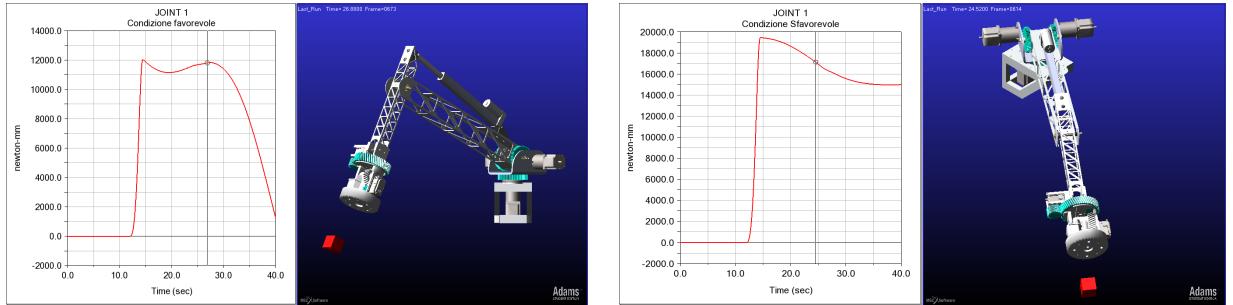


Figura 3.4. Coppia richiesta al motore per attuare la rotazione della base con braccio disteso e ritratto

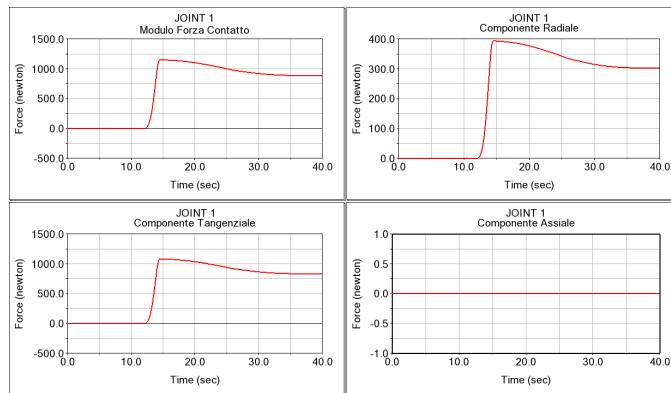


Figura 3.5. Forze scambiate nell’ingranamento

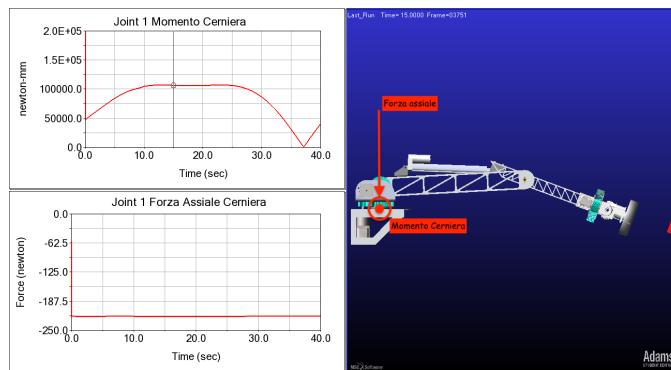


Figura 3.6. Momento di ribaltamento sul giunto e forza assiale nella configurazione più sfavorevole

Questa condizione può essere comunque recuperata dalla presenza di un encoder che misuri la posizione effettivamente raggiunta.

Successivamente bisogna verificare che il componente scelto per la cerniera possa sopportare i carichi imposti dal meccanismo quando si trova nella condizione più sfavorevole. Dai dati raccolti in figura 3.6 il carico assiale massimo è inferiore ai 7000 Newton previsti dalla scheda tecnica e il momento massimo è inferiore ai 200 Newton per metro previsti. Pertanto il componente è sicuramente in grado di sopportare i carichi imposti dal robot garantendo di non generare giochi nella trasmissione.

### 3.1.2 Joint 2

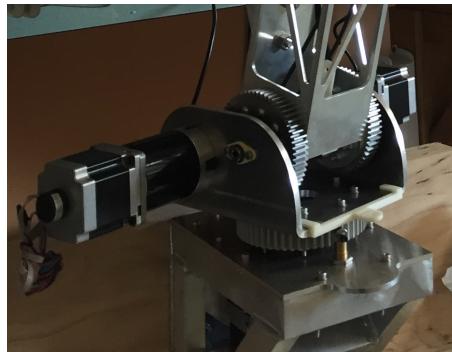


Figura 3.7. Disposizione dei motori passo-passo e della ruota condotta flagiata al link 3

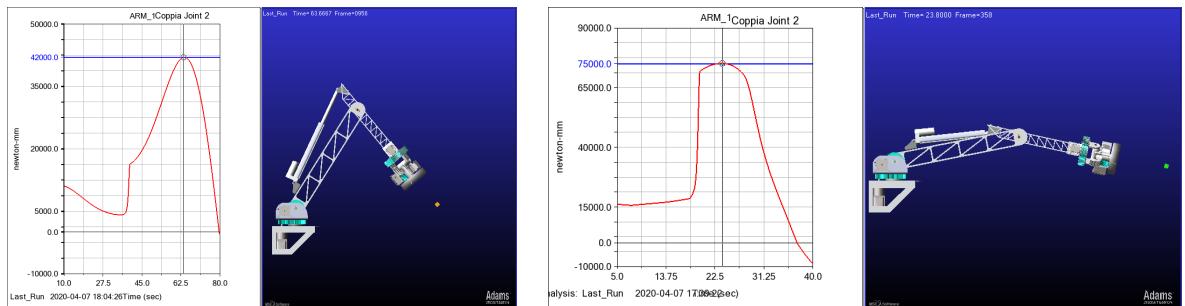


Figura 3.8. Valori di coppia richiesti nel caso in cui ci fosse un solo attuatore

Per il Joint 2 sono stati scelti gli stessi motoriduttori mostrati precedentemente, montati in configurazione gemellata come si vede nella figura 3.7.  
Questa soluzione si è resa necessaria in quanto un solo attuatore non è sufficiente a garantire la coppia necessaria come mostrato in figura 3.8 e per realizzare una simmetria delle coppie di reazione che si scaricano sulla struttura del Link 2.  
I due attuatori lavorano su una stessa trasmissione e sommano la loro azione annullando vicendevolmente la torsione che si sarebbe scaricata sul Link 3 della trave del braccio, permettendo al team di analisi FEM di validare un design leggero grazie alla simmetria degli

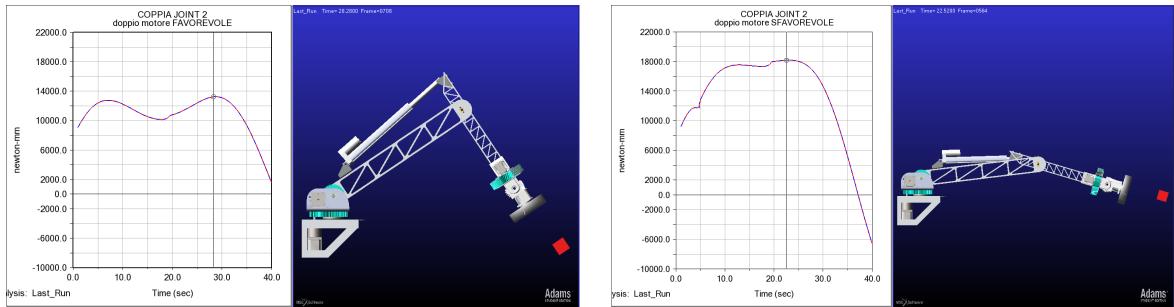


Figura 3.9. Valori di coppia richiesti con due attuatori gemellati

sforzi. Nella soluzione con 2 attuatori come si vede in figura 3.9 le prestazioni del motore sono sufficienti a movimentare il carico.

Il modello multibody anche in questa fase si è rivelato fondamentale per poter fornire dei carichi verosimili da applicare all’analisi strutturale e nell’ottimizzazione della struttura da parte del team di analisi FEM.

L’attuatore trasferisce il moto al Link 3 del braccio mediante un ingranamento tra ruote dentate a denti dritti di modulo 1,5 e rapporto di riduzione 3. Al motoriduttore è applicato un pignone da 20 denti *MISUMI GEAKS1.5-20-15-B-12N* e al link 3 una ruota condotta da 60 denti *GEAKS1.5-60-15-A-12N* con larghezza fascia 15mm.

Z1	Z2	Rapporto	a. pressione	a. elica	modulo	larghezza fascia	materiale
20	60	3	20°	0°	1,5	15 mm	C45

L’ingranamento non è stato dimensionato in quanto si ritiene sicuramente verificato per la potenza in gioco e la ruota condotta applicata al link 3 offre un perfetto compromesso dimensionale per poterla flagiare direttamente sul link 3 come si vede in figura 3.7 con una corona di viti, in modo da non richiedere un albero di trasmissione, una cartella o la realizzazione di sedi linguetta sulla sottile trave in alluminio che aveva evidenziato una forte criticità dal punto di vista strutturale e di concentrazione degli sforzi.



Figura 3.10. Dettaglio del cuscinetto del Joint 2

La cerniera del Joint 2 è realizzata da due cuscinetti senza corpi volventi flangiati *IGUS JFL-12* che possono essere usati per realizzare una sede calibrata per albero in tolleranza standard quando applicati all'interno di un foro calibrato su lamiera, senza richiedere lavorazioni aggiuntive o una cartella. Un dettaglio si trova in figura 3.10.

## 3.2 Attuatori Lineari, Cinematismo Joint 3



Figura 3.11. Sistema di trasmissione di un robot KUKA KR5

Nella scelta dell'attuatore per il Joint 3 è rilevante non solo la potenza richiesta ma anche il peso del componente. Difatti il punto debole degli attuatori passo-passo precedentemente descritti è sicuramente il rapporto tra peso del componente e potenza erogata che è sfavorevole.

Per il Joint 3 la scelta di un attuatore rotativo sufficientemente potente da collocare sull'asse del giunto avrebbe peggiorato fortemente le proprietà inerziali del Link 3, collocando una massa importante concentrata in punta alla trave.

Nei robot industriali questo problema viene aggirato collocando i motori alla base dei link e trasmettendo il moto ad altà velocità di rotazione tramite una cinghia contenuta all'interno della trave e collocando un riduttore epicicloidale o armonico dotato di encoder coassiale al giunto come in figura 3.11.

Per risolvere questo problema si è optato per una soluzione alternativa e non convenzionale nel mondo dei robot industriali.

La scelta di un attuatore lineare, un componente molto economico e di larga diffusione nelle forniture di automazione, ha permesso di posizionare l'attuatore e quindi la sua massa molto in basso e di non appesantire il link 3.

Gli attuatori lineari di questo tipo sono generalmente costituiti da un motore in corrente continua a spazzole, un riduttore ed una trasmissione vite-madrevite che trasforma il moto rotativo in uscita dal motore in traslazione lungo un giunto prismatico come si vede in figura 3.12.

L'attuatore è inoltre dotato di interruttori di fine corsa che ne limitano il moto all'escursione prevista. Il sistema di controllo è molto semplice, essendo fondamentalmente un motore in corrente continua, basta invertire i contatti per invertire il senso del moto.

Per pilotare l'attuatore è stato scelto un driver per motori DC della STMicroelectronics,



Figura 3.12. Interno di un attuatore lineare del tipo scelto nel progetto

l'integrato L6206 che include in un solo componente un ponte H a semiconduttori, una pompa di carica per pilotare i MOSFET che costituiscono il ponte e la logica di controllo necessaria a realizzare anche un pilotaggio PWM per avere velocità variabili e il funzionamento nei 4 quadranti della caratteristica elettrica del motore.

I parametri progettuali che è necessario determinare per la scelta dell'attuatore sono :

- La lunghezza dell'attuatore completamente ritratto e la corsa necessaria per rispettare il workspace calcolato
- La posizione delle cerniere di ancoraggio e la lunghezza del braccio di leva su cui agisce l'attuatore
- La forza necessaria per movimentare il carico
- La velocità di traslazione massima

Lo studio cinematico, quindi delle lunghezze e della posizione delle cerniere è stato sviluppato grazie al modello multibody. Una caratteristica di questi modelli è la parametrizzazione.

Grazie alla possibilità di parametrizzare alcune variabili che costituiscono il modello si può svolgere un esperimento di esplorazione del design.

Fissato un obiettivo, che in questo caso è l'escursione di almeno 100° di rotazione del giunto per rispettare il workspace previsto, si realizzano varie simulazioni in cui variano dei parametri, in questo caso l'escursione dell'attuatore e la posizione delle cerniere.

Con questo approccio è stato rapidamente determinato che un attuatore con escursione di 200 millimetri era il compromesso ideale tra quelli disponibili in commercio. Il modello scelto, commercializzato da SKF con codice *CAHB-10-B3A-200* ha un carico massimo di 500 Newton a velocità nominale di 15 millimetri al secondo.

Se superato il carico massimo la velocità si riduce per caratteristica del motore in corrente continua aumentando l'assorbimento di corrente, ciò si verifica solo per un breve istante prima dell'arresto.

Dalla figura 3.13 si evidenzia inoltre che la velocità angolare imposta sulla cerniera non ha un andamento lineare, ciò è dovuto al triangolo che si forma tra attuatore e cerniere.

Questo comportamento viene corretto dalla misura di velocità da parte dell'encoder rotativo posto sul giunto che tramite la logica di controllo fa variare il duty cycle imposto al motore e quindi la velocità di estensione dell'attuatore in modo da avere sempre una velocità di rotazione costante del giunto.

### 3.3 – Servomotori digitali: Dynamixel MX-106

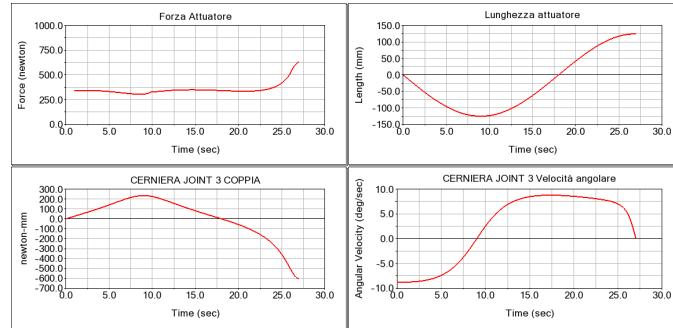


Figura 3.13. Dati raccolti nell’iterazione finale dello studio di design in cui viene compiuta una corsa completa del giunto

## 3.3 Servomotori digitali: Dynamixel MX-106

Per la movimentazione dei giunti di orientamento del polso sferisco è stato necessario considerare requisiti diversi dai giunti di posizionamento.

Nel polso sferico è richiesta precisione angolare ad alta velocità di rotazione e la capacità di mantenere una data posizione angolare al variare del carico.

Pertanto è richiesto un controllo in posizione dell’attuatore più raffinato di quello ottenibile per via meccanica negli attuatori precedentemente analizzati. Inoltre visto che il componente si trova all’estremità del link 4 il peso è un fattore importantissimo nella scelta.

Dopo una ricerca nel panorama dei componenti industriali si è presto concluso che un componente ad uso industriale è troppo voluminoso e pesante ed utilizza protocolli di comunicazione poco applicabili ad un progetto sperimentale.



Figura 3.14. Attuatori Dynamixel presenti a bordo del rover TRINITY durante un test di integrazione, a sinistra gli MX-106

La ricerca è stata orientata allora a prodotti specifici per la robotica sperimentale e i servomotori della *ROBOTIS* sono emersi tra i più diffusi nel settore. Dal catalogo è stato selezionato il modello *MX-106*.

Dalla tabella delle caratteristiche fornite dal produttore in figura 3.15 si evidenzia subito

Item	Specifications
MCU	ARM CORTEX-M3 (72 [MHz], 32Bit)
Position Sensor	Contactless absolute encoder (12Bit, 360 [°]) Maker : ams(www.ams.com), Part No : AS5045
Motor	Coreless(Maxon)
Baud Rate	8,000 [bps] ~ 4.5 [Mbps]
Control Algorithm	PID control
Resolution	4096 [pulse/rev]
Backlash	20 [arcmin] (0.33 [°])
Operating Mode	Joint Mode (0 ~ 360 [°]) Wheel Mode (Endless Turn)
Weight	165 [g]
Dimensions (W x H x D)	40.2 x 65.1 x 46 [mm]
Gear Ratio	225 : 1
Stall Torque	8.0 [Nm] (at 11.1 [V], 4.8 [A]) 8.4 [Nm] (at 12[V], 5.2 [A]) 10.0 [Nm] (at 14.8 [V], 6.3 [A])
No Load Speed	41 [rev/min] (at 11.1 [V]) 45 [rev/min] (at 12 [V]) 55 [rev/min] (at 14.8 [V])
Radial Load	1 40 [N] (10 [mm] away from the horn)
Axial Load	1 20 [N]
Operating Temperature	-5 ~ +80 [°C]
Input Voltage	10.0 ~ 14.8 [V] (Recommended : 12.0 [V])
Command Signal	Digital Packet
Protocol Type	TTL Half Duplex Asynchronous Serial Communication with 8bit, 1stop, No Parity RS485 Asynchronous Serial Communication with 8bit, 1stop, No Parity
Physical Connection	RS485 / TTL Multidrop Bus
ID	254 ID (0 ~ 253)
Feedback	Position, Temperature, Load, Input Voltage, etc
Material	Full Metal Gear Engineering Plastic(Front, Middle, Back) 1 Metal(Front)
Standby Current	100 [mA]

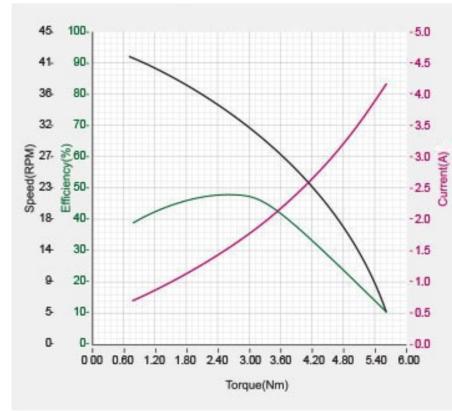


Figura 3.15. Caratteristiche tecniche dell'MX-106

la compattezza, la leggerezza del componente e le possibilità di controllo offerte tramite un semplice protocollo di comunicazione seriale implementabile sia su un microcontrollore sia direttamente da un computer dotato di interfaccia seriale.

Guardando alla caratteristica meccanica in figura 3.15 l’attuatore ha le performance migliori nell’intervallo di velocità tra 30 e 40 giri al minuto con una coppia massima di 3 Newton per metro ed in questo intervallo si cercherà di progettare la trasmissione.

Il produttore fornisce i modelli CAD tridimensionali del componente e delle flange di accoppiamento per l’albero di uscita scanalato. L’utilizzo di flange, dette Horns, permette di accoppiare all’albero di uscita scanalato componenti prodotti in manifattura additiva mediante viti.

Ogni attuatore viene alimentato e riceve il bus dati attraverso un collegamento daisy chain, è quindi possibile realizzare una catena semplificando il cablaggio, che come vedremo per il polso sferico è molto delicato.

## Capitolo 4

# Polso sferico, design e scelte progettuali

### 4.1 Descrizione

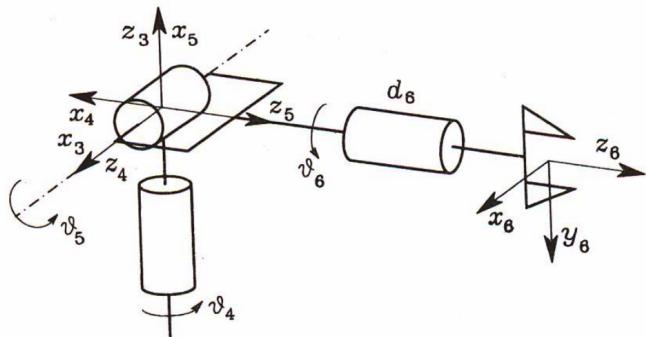


Figura 4.1. Schema dei giunti del polso sferico con rappresentata una terna dell'utensile

Il polso sferico progettato per il manipolatore robotico del Rover TRINITY è un componente compatto, integrato e realizzato in manifattura additiva. La caratteristica chiave di un polso sferico è il disaccoppiamento tra posizione e orientamento dell'utensile; il braccio ha il compito di posizionare il punto di origine della terna utensile, mentre il polso determina l'orientamento della terna utensile.

La sfericità del polso è data dal fatto che gli assi dei giunti si intersecano tutti nello stesso punto.

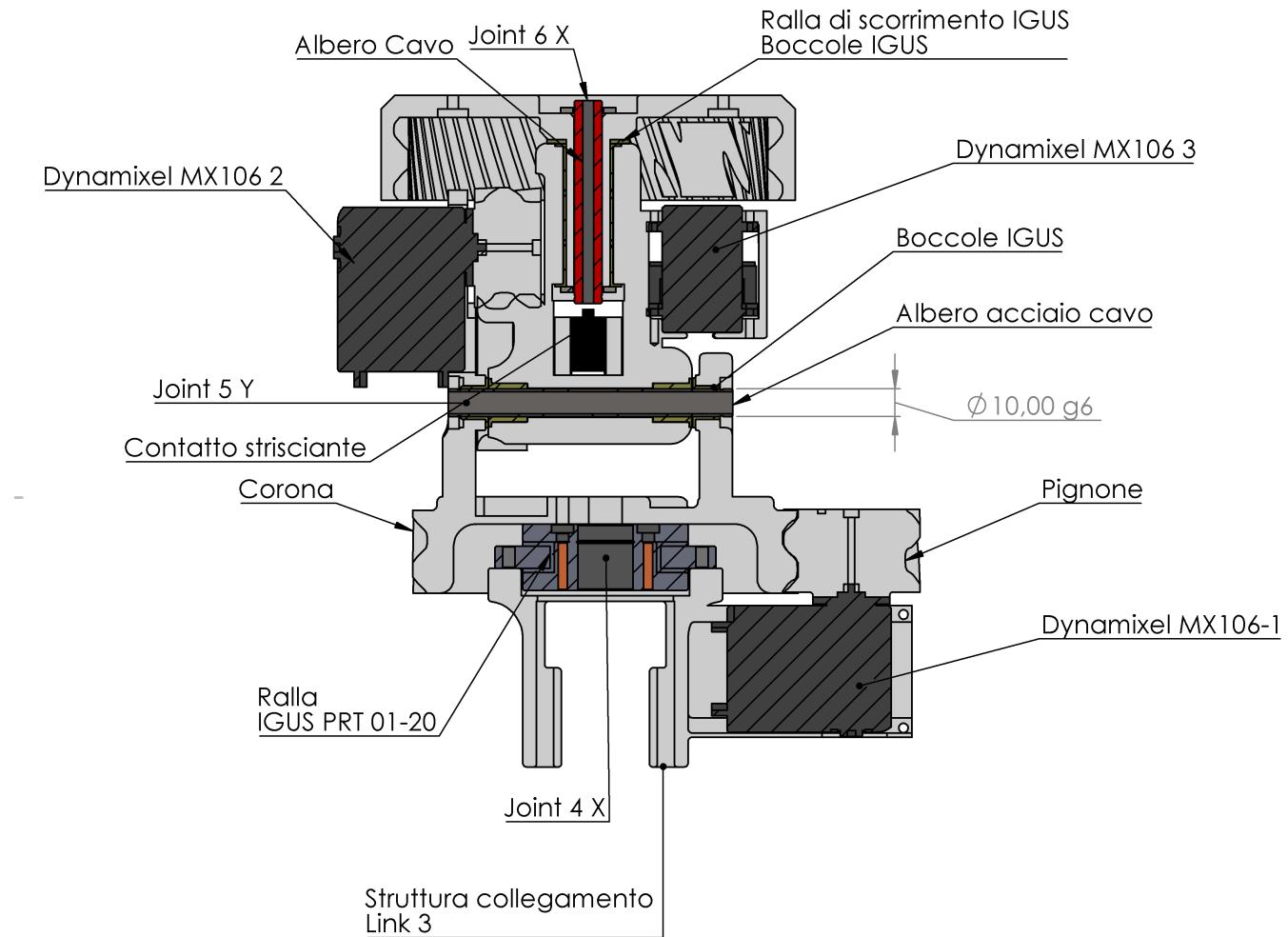


Figura 4.2. Sezione del componente realizzato con evidenziati i punti salienti trattati in questo capitolo

## 4.2 Studio del materiale da stampa ABSPlus P430

In funzione della possibilità di realizzare componenti in manifattura additiva presso i laboratori del Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale il Team DIANA ha deciso di approfondire la conoscenza delle risorse di produzione a disposizione.

Il processo di stampa a deposizione di filamento (FDM) produce componenti caratterizzati da una struttura interna non isotropa, caratterizzata dalla presenza di layers e aree vuote. Nel caso della FDM il materiale non è isotropo, nello specifico l'anisotropia è data sia dalla direzione della stampa (cioè la direzione dei piani depositati), dove è più resistente nello strato che tra gli strati, sia dalla geometria dell'infill (geometrie che sostituiscono il volume

interno in maniera più efficiente).

Pertanto è evidente che le proprietà meccaniche dipenderanno dalla direzione in cui sono applicati gli sforzi. Usando queste strutture si ottiene una struttura più leggera ma con proprietà non altrettanto inferiori.

Il produttore del materiale e dell'attrezzatura di stampa fornisce una caratterizzazione del materiale isotropo, estruso come componente solido.

Questa condizione è però lontana dall'utilizzo reale, in quanto genera componenti estremamente costosi in termini di peso, tempo di lavorazione e quantità di materiale impiegato. Date le risorse a disposizione, per realizzare un studio quantomeno indicativo sulle proprietà del materiale, è stato prodotto un set di provini e sottoposto a prova di trazione.

Per le prove di trazione si segue la normativa *ASTM D638 Standard method for Tensile Plastics*. Questa normativa permette di ottenere le proprietà a trazione di materiali polimerici sia semplici che rinforzati usando provini a forma di osso di cane.

Questo test è utilizzabile per campioni con spessore fino a 14 mm. Questo metodo inoltre permette di ottenere il modulo di poisson a temperatura ambiente.

Tabella 4.1. Dati sperimentali raccolti dalle prove effettuate

Item	Peso(g)	Spessore (mm)	Largh. (mm)	area	E (GPa)	E (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elong. (%)
1	7,85	3,35	12,74	42,68	0,81	806,67	15,04	5,12
2	7,80	3,40	12,78	43,45	0,88	880,80	17,96	5,50
L	7,83	3,39	12,80	43,38	0,96	955,62	16,54	5,21
3	8,71	3,45	12,95	44,68	0,91	907,36	16,46	5,09
4	8,75	3,40	12,87	43,76	0,89	885,46	15,76	4,88
M	8,69	3,41	12,85	43,81	1,08	1083,89	19,26	5,37
5	9,86	3,48	12,80	44,54	1,18	1180,36	19,97	6,22
6	9,91	3,40	12,81	43,55	1,37	1371,50	22,02	7,22
P	9,87	3,50	12,77	44,70	1,28	1280,19	21,91	7,01

Si può concludere che ci sia una significativa differenza sia nel modulo elastico che nella tensile strength nei campioni con differente riempimento.

Con un minimo di 806,67 MPa, cioè il 58,81(%) del valore massimo di 1371,508 MPa per il modulo elastico e un minimo di 15,04 MPa, cioè il 68,3(%) del massimo di 22,02 MPa per la tensile strength si vede non solo una forte influenza del filling ma anche la mancanza di ripetibilità del meccanismo produttivo.

I campioni così stampati hanno valori circa della metà del materiale (Tensile strength = 44.81 Mpa, Modulo = 2.21 GPa) ma risultano superiori ai risultati trovati in letteratura [6], questo risultato è da imputare probabilmente alla migliore adesione tra gli strati.

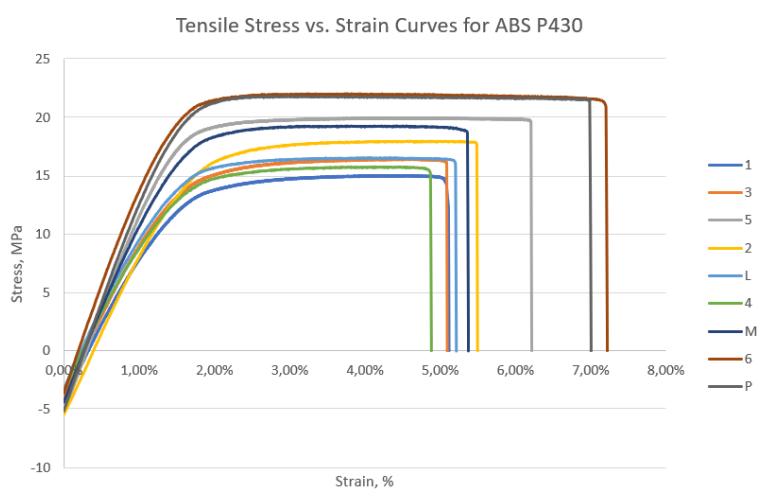


Figura 4.3. Grafico Sforzo-Deformazione ottenuto

### 4.3 Integrazione e requisiti progettuali

I requirements che sono emersi dal primo studio di design sono :

- Tutta la parte in movimento del componente dovrà trovarsi all'interno dell'inviluppo sferico generato dalla rotazione del Joint 4 per garantire che non ci siano zone interdette al moto.
- Il Joint 4 deve
- Sono necessari dei passaggi per i cavi degli attuatori, quindi sono stati scelti alberi forati assialmente per le cerniere e predisposto un contatto strisciante a 12 conduttori per il Joint 6. I cavi passando all'interno degli alberi non rischiano di incastrarsi nei denti delle ruote dentate.
- Minimo peso possibile per gli accessori, i cuscinetti sono un target su cui ridurre le masse.
- Da una prima considerazione delle potenze in gioco, confrontate col modello multi-body e con la caratteristica meccanica dell'attuatore è necessaria una riduzione con rapporto di almeno 2 per rendere possibile il funzionamento a pieno carico, ma un rapporto 3 sarebbe ideale.
- La precisione della stampante UPRINT verificata con delle prove di stampa di dentature non è sufficiente per realizzare un ingranamento di buona qualità al di sotto del modulo 2.
- La stessa considerazione sulla precisione vale per i cuscinetti, che risultano avere sedi poco accurate.

## 4.4 Scelta dei Cuscinetti

I test effettuati sulla realizzazione di sedi per cuscinetti con la stampante UPRINT hanno dimostrato alcune criticità, peraltro diffuse e confermate dalla comunità di utilizzatori di stampa FDM per componenti meccanici.

Le tolleranze dimensionali e di circolarità normalmente richieste per accoppiare un cuscinetto a corpi volventi sono state determinate per le lavorazioni tradizionali ad asportazione di truciolo. Viene semplice verificare la circolarità di una sede utilizzando un tornio o una rettificatrice, molto meno su un componente stampato in 3D.

Il reparto meccanico del Team DIANA ha rilevato che le sedi realizzate non hanno una circolarità regolare e il diametro varia con le stampe in maniera non ripetibile. Pertanto un accoppiamento bloccato con forzamento (possibile con una piccola forza applicabile manualmente) risulta più sicuro di un accoppiamento incerto classico per cuscinetti.

I cuscinetti a strisciamento IGUS sono dimensionati per il piantaggio in sede. Il dimensionamento definitivo si ottiene dopo adeguato piantaggio, pertanto le quote e le tolleranze vanno rilevate a boccola montata. Dopo alcune prove su piccoli componenti di prova è stata trovata una regola di tolleranza che garantiva un buon fissaggio sui diametri solitamente utilizzati dal reparto meccanico.

Un altro vantaggio di questi cuscinetti è il peso irrisorio rispetto a un cuscinetto a corpi volventi confrontabile, infatti la boccola  $\phi 10$  e lunghezza 10 pesa appena 3 grammi mentre il modello *SKF 6200* ne pesa 30.

## 4.5 Riduzione del numero minimo di denti: ingranamento elicoidale

Affinchè l'ingranamento tra due ruote dentate, come si legge dal testo [5], avvenga in modo corretto è necessario che il contatto avvenga lungo il profilo ad evolvente dei denti.

Il caso limite da evitare è quello in cui avviene una compenetrazione dei denti delle ruote, ossia interferenza. Per evitare l'interferenza è necessario che l'addendum, pari al modulo in un sistema modulare, assuma un valore tale da far cadere il punto di contatto all'interno del segmento di contatto.

$$\frac{a}{m} \leq \frac{z_1}{2} \sqrt{\frac{1}{\tau^2} + \left(1 + \frac{2}{\tau}\right) \sin^2 \alpha} - \frac{1}{\tau} \quad (4.1)$$

Nella relazione 4.1 viene esplicitato la relazione che deve esserci tra addendum e il rapporto di trasmissione  $\tau = \frac{r_1}{r_2}$

$$Z_{min} = \frac{2[1 + \sqrt{1 + (2\tau + \tau^2) \sin^2 \alpha}]}{(2 + \tau) \sin^2 \alpha} \quad (4.2)$$

Se esplicitiamo il valore del numero di denti del pignone  $Z_{min}$  otteniamo la relazione 4.2. Calcolando la formula per una rotismo con  $\tau = \frac{1}{3}$  e angolo  $\alpha = 20$  otteniamo un valore  $Z_{min} = 17$ .

Questa condizione pone un limite progettuale piuttosto invasivo per la riduzione delle

dimensioni. A parità di modulo si otterranno ruote di diametro maggiore se si vuole mantenere lo stesso rapporto di trasmissione.

Produrre ingranaggi è un'operazione tradizionalmente costosa e complessa a livello tecnologico: è richiesta una dentatrice oppure appositi utensili di forma già solo per una semplice dentatura a denti dritti.

Produrre una dentatura elicoidale è ancora più complesso essendo necessaria una variazione dell'angolo di incidenza della dentatrice e pertanto sicuramente sconveniente per realizzare un prototipo, dovendosi rivolgere a ditte specializzate con costi elevati.

La manifattura additiva pone in gioco un'infinita possibilità di forme e design, con la possibilità di integrare il componente strutturale con quello di trasmissione e realizzare pezzi unici e dalle geometrie arbitrarie.

Questa possibilità offerta dalla manifattura additiva apre sicuramente la strada alla valutazione di una dentatura elicoidale. Per calcolare il numero minimo di denti da assegnare ad una ruota elicoidale si fa riferimento ad una ruota fittizia a denti dritti su cui calcolare in numero minimo di denti.

Bisogna ricordare infatti, come illustrato nel testo [5] nel capitolo sulle ruote dentate elicoidali, che una ruota dentata elicoidale mantiene in ogni sezione effettuata da un piano frontale normale all'asse della ruota la forma di una evolvente del cilindro fondamentale. Tale proprietà non vale per una sezione normale all'elica primitiva e l'intersezione è rappresentata da un'ellisse con semiassi pari a  $a = \frac{r}{\cos\beta}$  e  $b = r$  dove  $\beta$  rappresenta l'angolo d'elica. Pertanto è lecito considerare il moto relativo tra le due ruote come un moto di rotolamento tra i due cilindri avente asse inclinato di  $\beta$ .

$$Z'' = \frac{2R}{mn} = \frac{Z}{\cos^3\beta} \quad (4.3)$$

Si considera che effettivamente l'ingranamento realizzato è quello di due ruote dentate a denti dritti aventi raggio  $R = \frac{r}{\cos^2\beta}$ , angolo di pressione  $\alpha$  e numero di denti pari a  $Z''$  come determinato nella relazione 4.3

$$Z = Z'' \cos^3\beta \quad (4.4)$$

E ricavando il numero di denti reale  $Z$  come in 4.4 otteniamo per la trasmissione studiata con angolo d'elica  $\beta = 20$  un valore di 14 denti.

Con questo accorgimento si riesce a ridurre il numero minimo di denti del pignone e così si ottiene una riduzione dei diametri a parità di rapporto di trasmissione ottenuto.

Si ottengono inoltre altri vantaggi che sono noti dalla letteratura e dall'esperienza nella costruzione e progetto di macchine:

- La variazione della distribuzione del carico sui denti avviene in maniera graduale
- Gli urti sono ridotti essendoci più denti in presa contemporaneamente
- Il gioco tra i denti di conseguenza è ridotto, quindi si riduce il backlash

## 4.6 Dimensionamento della trasmissione

### 4.6.1 Metodo di Lewis

Per un primo dimensionamento della trasmissione si è scelto di utilizzare il metodo di Lewis.

Il dimensionamento di un ingranaggio, essendo nota la cinematica (rapporto di trasmissione, numeri di denti, angolo di pressione e angolo d'elica), si effettua con la determinazione del modulo normale  $m_n$  e della larghezza di fascia (sviluppo del dente nella direzione dell'asse di rotazione).

Nel caso di studio in oggetto la larghezza di fascia è molto condizionata dagli ingombri che devono avere i componenti e si è deciso di fissarla e determinare il modulo normale.

Nel caso di dimensionamento statico vengono confrontate delle tensioni calcolate, rispettivamente una tensione di flessione (ottenuta tramite la formula di Lewis) e una dovuta al contatto hertziano (calcolata secondo le formule finali della teoria di Hertz), con una tensione ammissibile nel materiale ottenuta dividendo il carico di rottura (o snervamento) per un opportuno coefficiente di sicurezza.

Nel caso del dimensionamento statico le tensioni massime calcolate sono ottenute considerando le forze massime scambiate dall'ingranaggio, quelle cioè che possono produrre rottura nel dente.

Come carico massimo si è scelto di prendere a riferimento il valore di coppia di stallo, o holding torque, degli attuatori *Dynamixel MX-106* pari a 8,4 Newton per metro. Difatti l'attuatore, in grado di misurare la corrente assorbita dal motore, correla il valore di soglia massima di corrente con la caratteristica elettrica del motore e disattiva l'alimentazione una volta raggiunta la holding torque.

Il calcolo statico a flessione di una ruota a denti elicoidali può eseguirsi estendendo opportunamente le formule valevoli per le ruote a denti dritti.

$$C = \frac{Ft}{\cos \beta} \quad (4.5)$$

La forza che sollecita il dente, basata sull'ipotesi di singolo dente in presa valida per Lewis è 4.5

$$b'' = \frac{b}{\cos \beta} \quad (4.6)$$

La larghezza di fascia effettiva proiettata sul cilindro di contatto 4.6

$$\sigma = \frac{\frac{Ft}{\cos \beta}}{\frac{b}{\cos \beta} m_n Y_{lw}} = \frac{Ft}{b m_n Y_{lw}} \quad (4.7)$$

Quindi la tensione flessionale è ricavata in 4.7 considerando il coefficiente  $Y_{lw}$  che si trova tabellato in letteratura tecnica

$$mn = \sqrt[3]{\frac{Y_{lw} \cdot C \cdot 2 \cos \beta}{\frac{\sigma_{yield}}{CS} \cdot b \cdot Z}} \quad (4.8)$$

Esplicitando il modulo normale rispetto alla larghezza di fascia, alla coppia di sollecitazione e alla tensione di snervamento, considerato un opportuno coefficiente di sicurezza restituisce il modulo normale come in 4.8.

### 4.6.2 Contatto Hertziano

Il calcolo a contatto hertziano verifica che le pressioni specifiche di contatto, cioè le tensioni di tipo hertziano che si instaurano localmente durante l'ingranamento, siano inferiori alla tensione ammissibile del materiale, già definita per il calcolo statico a flessione.

Un'eccessiva pressione specifica di contatto, infatti, comporterebbe un deterioramento della superficie del dente, inaccettabile ai fini di un corretto funzionamento dell'ingranaggio. Dal punto di vista del contatto hertziano due denti diritti che ingranano possono essere considerati come due cilindri a contatto lungo una generatrice di lunghezza pari alla larghezza di fascia del dente  $b$ .

Il carico normale all'orma di contatto  $P$  è ancora la forza  $F$  che si scambiano i denti lungo la retta dei contatti.

$$\sigma_H = 0,629 \cdot 0,418 \cdot \sqrt{\frac{\frac{Ft}{\cos \alpha} \cdot E \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) \cdot \frac{1}{\sin \alpha}}{\frac{b}{\cos \beta}}} \leq \frac{\sigma_{Yeld}}{CS} \quad (4.9)$$

La relazione con cui si effettua la verifica delle ruote elicoidali è [4.9](#)

### 4.6.3 Codice di calcolo

```

function [Y] = lewis_factor (Zn)
load lewisdata
i=1;
while lewisdata.Z(i)<Zn
    i=i+1;
end
Y=lewisdata.Y(i);
end

%carico tabella dati di progetto
load data
%coefficiente di sicurezza
CS=2.5;
CSHertz=1.2;

%calcolo formula di Lewis, modulo normale
data.mn=(lewis_factor(data.Z1)*(data.Cn*1000)*
2*cosd(data.beta)/(data.sigmas/CS)/
data.larghezza/data.Z1)^(1/3);

%calcolo rapporto di trasmissione
data.tau=data.Z2/data.Z1;

%calcolo raggi primitivi
R1=0.5*data.mn*data.Z1;
R2=0.5*data.mn*data.Z2;

```

```

%calcolo forze
data.Ft=data.Cn*1000/R1;
data.F0=data.Ft/cosd(data.alfa);
data.Fr=data.F0*sind(data.alfa);
F=data.Ft/cosd(data.alfa)/cosd(data.beta);
data.Fa=F*sind(data.beta);

%calcolo tensione di contatto Hertz
data.sigmaH=0.629*0.418*((data.Ft/cosd(data.alfa))*(
(data.E*1000)*((1/R1)+(1/R2))*(1/sind(data.alfa))/(
(data.larghezza/cosd(data.beta)))^(1/2));

if data.sigmaH<(data.sigmaS/CSHertz)
    data.Hertz="SI";
else
    data.Hertz="NO";
end
%scrivo tabella risultati su file excel
writetable(data,'POLSO.xls');

```

Per semplificare il processo di calcolo è stato utilizzato un semplice script in codice Matlab 4.6.3 che calcola le grandezze necessarie al dimensionamento e il modulo normale a partire da una tabella **data** contenente il numero di denti delle due ruote, la larghezza di fascia, gli angoli di pressione e di elica e le proprietà meccaniche del materiale. Sono inoltre calcolate le forze scambiate dai denti nei piani tangenziale, radiale, assiale.

#### 4.6.4 Risultati Joint 4

Tabella 4.2. Dati calcolati Joint 4

Z1	Z2	angolo pressione	angolo elica
19	54	20°	20°
Ft [N]	F0 [N]	Fr [N]	Fa [N]
383,8	408,8	139,7	148,638
modulo normale	Larghezza [mm]	Pressione contatto	Verifica Hertz
2,304	30	11,3	SI



Figura 4.4. Ingranamento studiato per il Joint 4

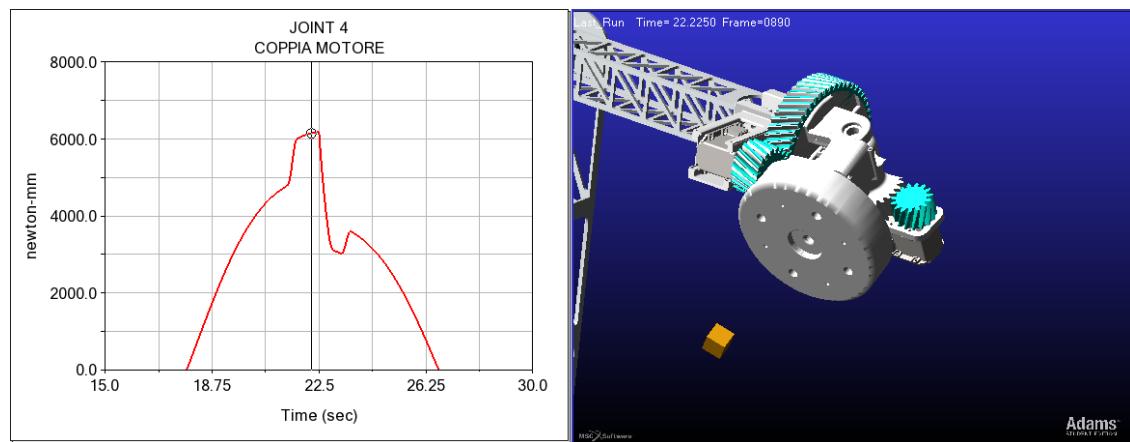


Figura 4.5. Misura della coppia richiesta all’attuatore durante una rotazione in configurazione sfavolrevole per il Joint 4

#### 4.6 – Dimensionamento della trasmissione

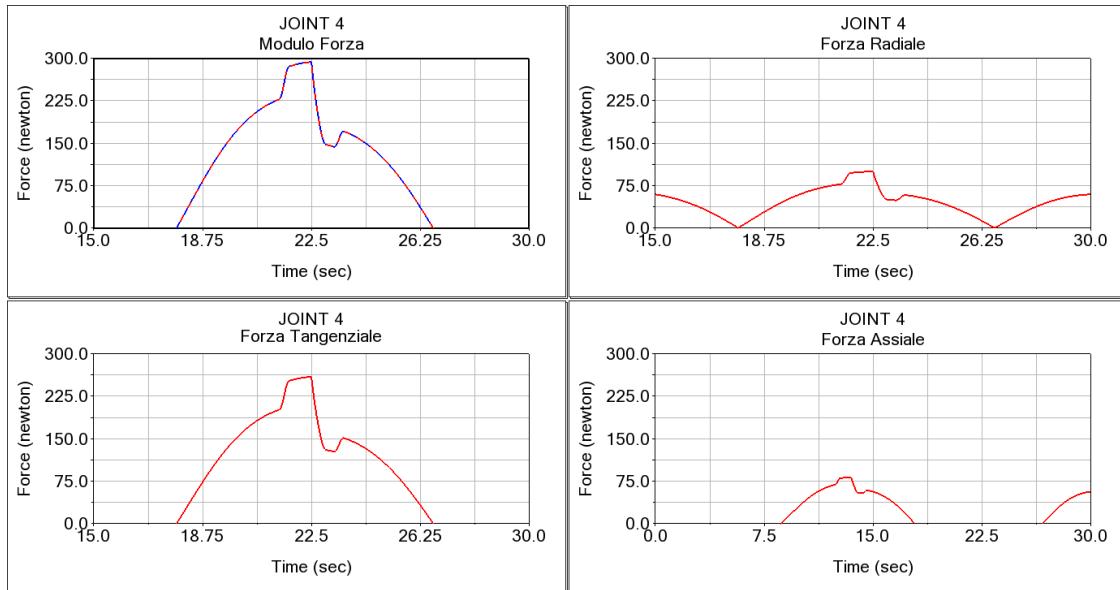


Figura 4.6. Misura della forze scambiate nella trasmissione per il Joint 4

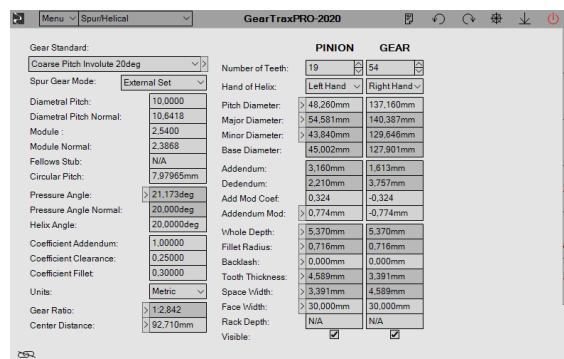


Figura 4.7. Parametri impostati nello script di design automatizzato GearTrax per il Joint 4

#### 4.6.5 Risultati Joint 5

Tabella 4.3. Dati calcolati Joint 5

Z1	Z2	angolo pressione	angolo elica
	15	30	20°
Ft [N]	F0 [N]	Fr [N]	Fa [N]
405,5	431,5	147,5	157,05
modulo normale	Larghezza [mm]	Pressione contatto	Verifica Hertz
2,56	24	14,06	SI



Figura 4.8. Ingranamento studiato per il Joint 5

#### 4.6 – Dimensionamento della trasmissione

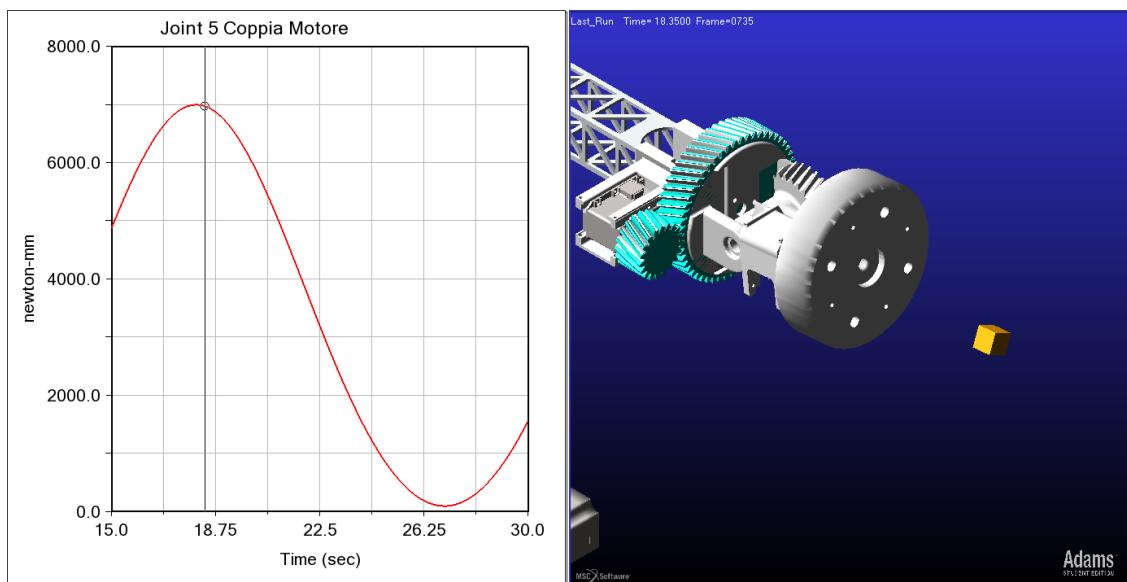


Figura 4.9. Misura della coppia richiesta all’attuatore durante una rotazione in configurazione sfavolrevole per il Joint 5

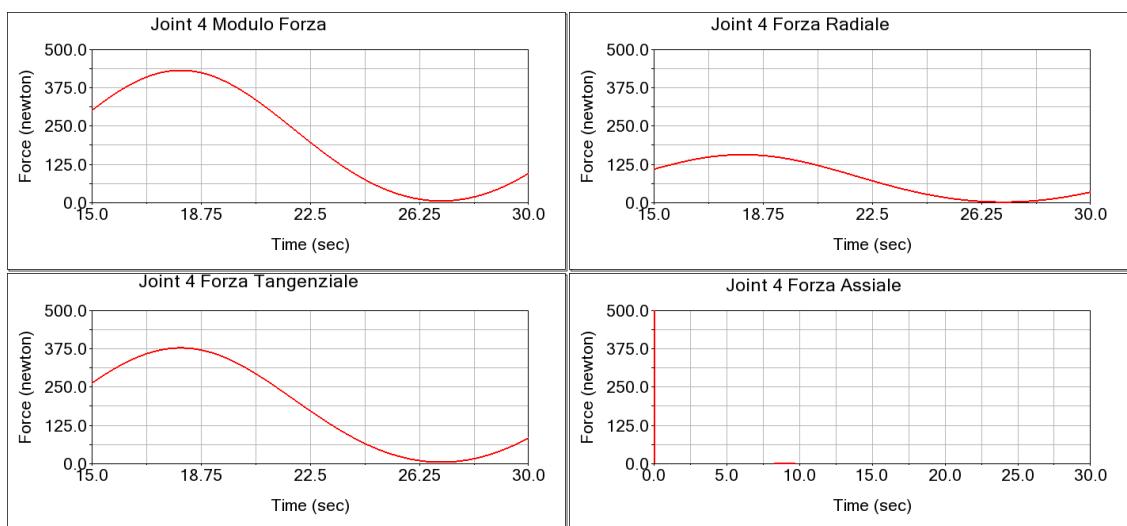


Figura 4.10. Misura delle forze scambiate nella trasmissione per il Joint 5

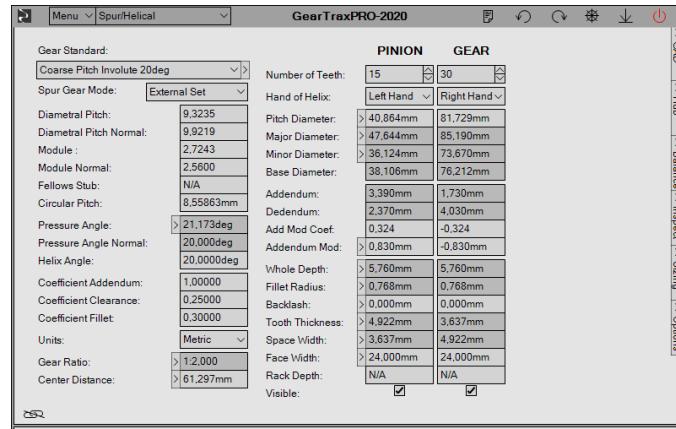


Figura 4.11. Parametri impostati nello script di design automatizzato GearTrax per il Joint 5

#### 4.6.6 Risultati Joint 6

Tabella 4.4. Dati calcolati Joint 6

Z1	Z2	angolo pressione	angolo elica
19	54	20°	20°
Ft [N]	F0 [N]	Fr [N]	Fa [N]
383,8	408,8	139,7	148,638
modulo normale	Larghezza [mm]	Pressione contatto	Verifica Hertz
2,304	30	11,3	SI

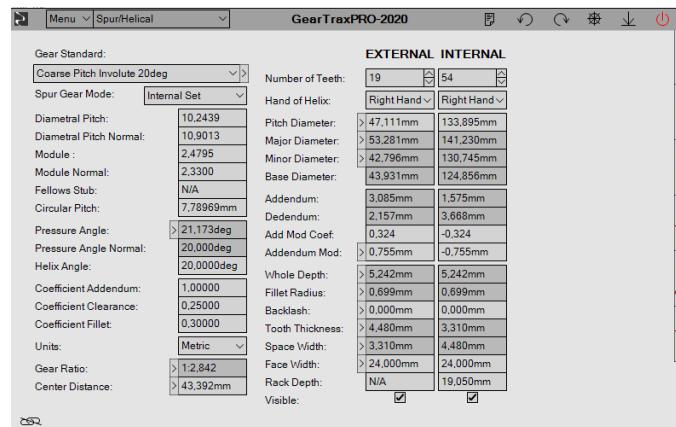


Figura 4.12. Parametri impostati nello script di design automatizzato GearTrax per il Joint 6

#### 4.6.7 Disegno di ruote dentate elicoidali prodotte in FDM

Per realizzare i modelli CAD delle ruote dentate calcolate, noto il modulo, il numero di denti, gli angoli caratteristici e la larghezza di fascia sono possibili diversi metodi.

Quello che appare più accessibile di prima analisi è utilizzare le capacità parametriche del *CAD Solidworks*, riportando la sezione di un dente ed estrudendolo lungo la generatrice dell'elica cilindrica.

Questo approccio trova subito un limite pratico: correggere il design per la necessità di una modifica implica di ricominciare dall'inizio la modellazione e poco si adatta a una progettazione iterativa.

Un approccio iterativo è stato necessario vista la necessità di coniugare i risultati di calcolo di dimensionamento con gli ingombri delle ruote e il collocamento degli attuatori sul polso. Soprattutto nel Joint 5 [4.8](#) il collocamento dell'attuatore per movimentare il Joint 6 è piuttosto complesso e doveva rispettare degli spessori minimi per la sede dell'albero, le dimensioni del Dynamixel e l'interasse della ruota interna del Joint 6.

Pertanto un software di disegno automatizzato di questi componenti ha rappresentato un aiuto importante nel realizzare velocemente i componenti e poter fare variazioni e tentativi per valutare la soluzione migliore.

Il software *GearTrax*, introdotto nel corso di Disegno di Macchine, prende il controllo del CAD e automaticamente genera le geometrie una volta configurati tutti i parametri che troviamo in figura [4.7](#) e [4.11](#) e [4.12](#).



# Capitolo 5

## Costruzione mediante manifattura additiva e assemblaggio

Nella realizzazione di un prototipo la parte sicuramente più interessante dopo la progettazione e la realizzazione dei modelli CAD è quella della costruzione del componente.

La manifattura additiva, al contrario delle tecnologie tradizionali che spesso richiedono una dotazione di macchine da officina e materiali da lavorare disponibili presso un'azienda esterna, ha concesso spesso agli studenti del *Team DIANA* di vedere realizzati rapidamente i propri progetti e partecipare al processo di produzione.

Una volta prodotti i componenti in FDM, programmati i servomotori e ricevuti i cuscinetti e la viteria necessaria è stato possibile assemblare il polso.

### 5.1 Produzione dei componenti

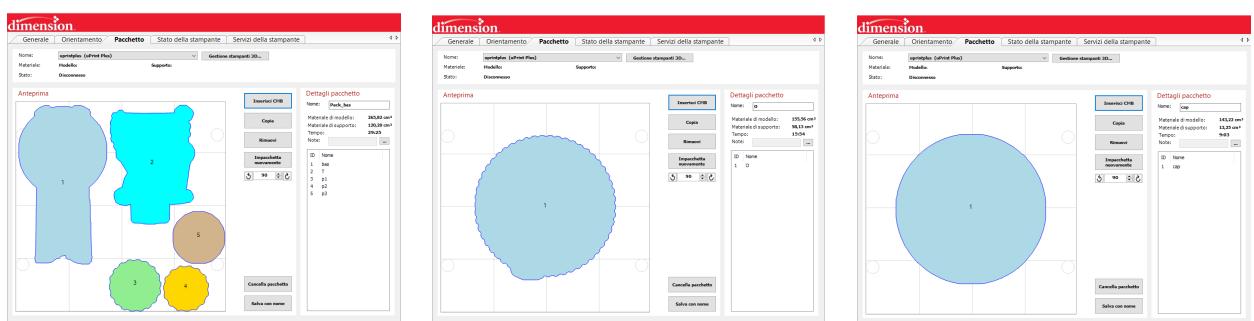


Figura 5.1. Pack di stampa in output dal software di slicing

La fase di produzione di un componente FDM parte dalla generazione del codice in linguaggio G-CODE per il controllo delle macchine utensili. La generazione del codice



Figura 5.2. Stampante Stratasys UPRINT SE e pack in fase di stampa

viene svolta in maniera automatizzata da un software di slicing, in questo caso *Stratasys CatalystEX* proprietario della stampante, che contiene già tutti i parametri necessari per una corretta configurazione della stampa.

All’utente spetta solo la collocazione dei manufatti da realizzare all’interno del *pack*, una rappresentazione del volume di stampa che ha come base la tavoletta removibile su cui vengono depositati i materiali.

Un fattore importante è la scelta dell’orientazione spaziale dei componenti e per le ruote dentate è assolutamente mandatorio adagiarle su un piano frontale e far sì che l’estrusione sviluppi il dente in altezza, in modo che ogni layer contenga una sezione del dente che conservi il profilo ad evolvente.

Come vediamo nella fotografia 5.2 i componenti dentati vengono estrusi sul piano frontale, assieme alle eventuali strutture di supporto che andranno rimosse in colore più chiaro.

Sono stati prodotti in totale 3 pack, per un tempo di stampa totale predetto dal software di 55 ore, in figura 5.1.

Una volta terminata la fase di stampa si rimuove la tavoletta e si staccano i pezzi, ripulendoli dai supporti di colore più chiaro che servono a sostenere le geometrie che sono sospese o in aggetto. Dopo la pulizia a volte è necessaria la sbavatura e la rifinitura mediante carta abrasiva sottile, limetta e taglierino per rimuovere bave e filamenti interrotti.

## 5.2 Analisi dei costi

In questa fase analizzeremo il costo di produzione di questo componente mediante manifattura FDM e il costo dei componenti accessori e degli attuatori. Il costo di un componente prodotto con questa tecnica è spesso elevato, ma giustificato dall’economia di poter produrre un singolo prototipo senza particolari costi di attrezzaggio e ordine di quantità minime di materiale. Il materiale utilizzato sia per la costruzione che per il supporto è fornito dalla produttrice della stampante in bobine da  $700\text{cm}^3$  per un costo al  $\text{cm}^3$  di Euro 0,33.

Tabella 5.1. Costi di Stampa 3D

Pack	Volume materiale [cm <sup>3</sup> ]	Volume supporto [cm <sup>3</sup> ]	costo [€ ]	ore stampa
1	265,82	120,2	123,53	29,5
2	155,56	58,13	68,38	16
3	143,22	13,25	50,07	9
<b>TOTALE</b>			241,98	54,5

In tabella 5.1 riportiamo i costi di stampa dei 3 pack realizzati, riferite alle quantità di materiale predette dal software *CatalystEX*. Il costo è sicuramente elevato, a causa del materiale proprietario usato dalla stampante, ma ha garantito un risultato positivo al primo tentativo senza sprechi di materiale.

Tabella 5.2. Costi di realizzazione

Numero	Articolo	costo [€]	Totale [€]
3	Dynamixel MX-106	450	1350
1	IGUS PRT-01-20	43	43
4	IGUS JFM 1014	2,95	11,8
2	IGUS JFM 1618	3,1	6,2
1	IGUS JSM 1618	2,8	2,8
2	Albero MISUMI FPSPJFF	13	26
<b>STAMPA 3D</b>			241,98
<b>TOTALE</b>			1681,78

Nella tabella 5.2 invece riportiamo il costo totale di stampa assieme a tutti gli altri componenti necessari all’assemblaggio. Spicca sicuramente il costo dei 3 attuatori Dynamixel, che essendo componenti specializzati per robotica hanno dei costi sicuramente elevati, anche se rappresentano un oggetto molto durevole nel tempo in quanto non sono stati acquistati ma riciclati da un precedente progetto del Team DIANA risalente al 2010.

## 5.3 Assemblaggio

L’assemblaggio del componente è molto semplice e facilmente intuibile dalla sezione 4.1. Una volta collocata la ralla *IGUS PRT 01 20* sul link 3 ed inserito in sede il primo attuatore completo di pignone è possibile avvitare alla ralla il link 4. Si inseriscono le boccole nelle rispettive sedi del link 4 e del link 5 e si avvitano i Dynamixel 2 e 3 in sede con viti M2.

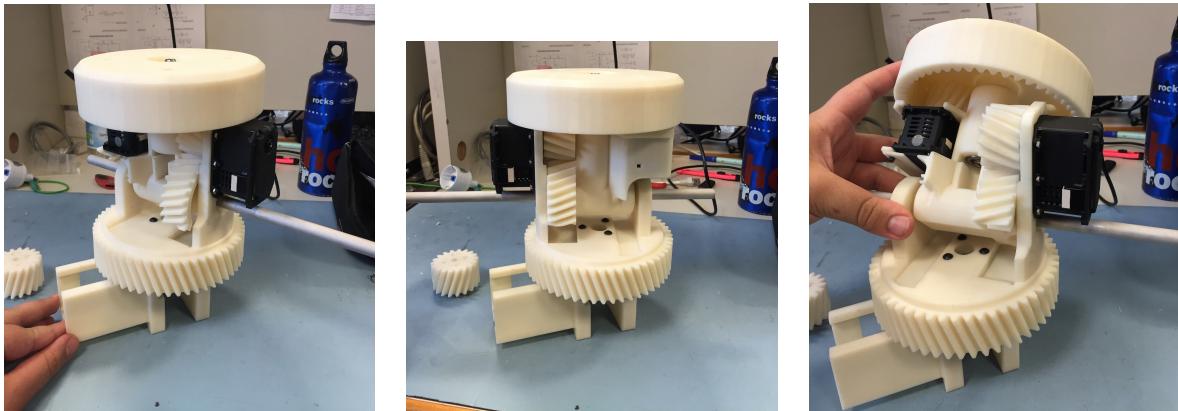


Figura 5.3. Polso assemblato per la prima volta dopo la fase di produzione e corredato dei servomotori

Così è possibile inserire il link 5 e l'albero della cerniera e una volta ruotato connettere i pignoni ai Dynamixel. Si completa l'assemblaggio con l'inserimento del link 6 completo di albero e si blocca con anelli seeger.

I cablaggi passano all'interno degli alberi e vengono completati di connettori saldati e ricoperti di guaina termorestringente e connessi al contatto strisciante per poter portare potenza e segnale anche ad un end effector.

Una volta completato il cablaggio e controllato con il multimetro l'assenza di cortocircuiti e la correttezza dei collegamenti è possibile alimentare con un alimentatore da banco a tensione di 12 Volt gli attuatori.

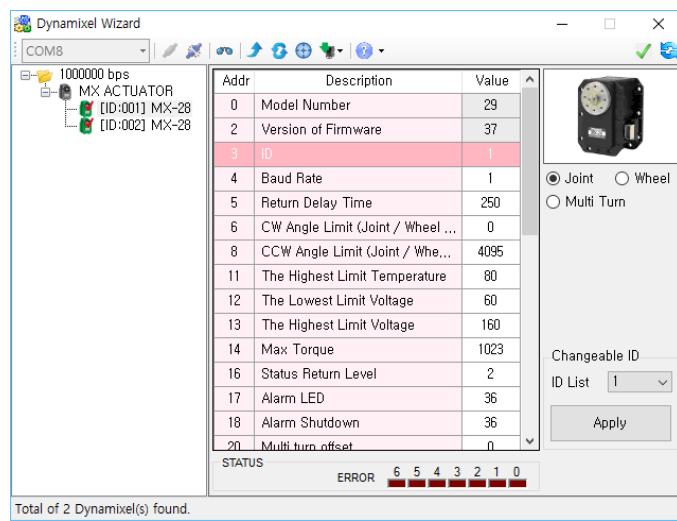


Figura 5.4. Software Dynamixel Wizard, permette di accedere a tutta la control table degli attuatori serie MX tramite un'interfaccia grafica

Tramite il software *Dynamixel Wizard* e un’interfaccia seriale USB è possibile connettere al PC gli attuatori ed effettuare la configurazione.

Per configurare il polso è necessario :

- Assegnare il baud rate di 57600 bps corrispondente al valore 34 dell’indirizzo 4 della Control Table
- Assegnare un ID corretto ad ogni attuatore all’indirizzo 3
- Inviare il comando di Torque Enable=1 all’indirizzo 24, questo farà andare in coppia gli attuatori
- Inviare Moving Speed = 300 all’indirizzo 32 corrispondente a 10 rpm
- Inviare Goal Position=0 all’indirizzo 30
- Verificare lo scostamento dallo zero e compensare con il comando Multi Turn Offset all’indirizzo 20 finché non sarà tutto centrato

Una volta configurato è possibile togliere l’alimentazione e i valori settati saranno conservati nella EEPROM degli attuatori oppure continuare ad inviare posizioni per verificare che vengano raggiunte. Il raggiungimento di posizioni interdette causa un urto e un bloccaggio, che viene risolto dal sistema di sicurezza di coppia massima degli attuatori che impedisce la rottura dei componenti o del servomotore.



## **Capitolo 6**

# **Risultati attesi ed ottenuti dal Robot realizzato**

- 6.1 Test e collaudo del Robot assemblato**
- 6.2 Carichi massimi applicati e precisione ottenuta**
- 6.3 Risultati nelle Competizioni studentesche**



# **Disegni ed elaborati tecnici**

# Bibliografia

- [1] European Rover Challenge, *Student Rules*, ERC, gennaio 2019
- [2] Mark W. Spong, Seth Hutchinson, and M. Vidyasagar, *Robot Modeling and Control*, JOHN WILEY
- [3] Bruno Siciliano • Lorenzo Sciavicco Luigi Villani • Giuseppe Oriolo *Robotics: Modelling, Planning and Control*, SPRINGER
- [4] Giovanni Jacazio, Stefano Pastorelli *Esercizi di meccanica applicata alle macchine*, Levrotto e Bella
- [5] Giovanni Jacazio, Stefano Pastorelli *Meccanica applicata alle macchine*, Levrotto e Bella
- [6] R. Henandez, D. Slaughter, D. Whaley, J. Tate, B. Asiabampour, Analyzing the tensile, compressive and flexural properties of 3D printed ABS P430 plastic based on printing orientation using fused deposition modeling, Proceedings of the 26th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference, 2016