

**ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITA' DI BOLOGNA**

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

- Sede di Forlì –

CORSO DI LAUREA  
IN INGEGNERIA MECCANICA

Classe LM 33

TESI DI LAUREA

In

Meccanica Applicata Alle Macchine Lm

**STUDIO E OTTIMIZZAZIONE DINAMICA DEL  
MANIPOLATORE "ANTROP"**

CANDIDATO

Roberto Carrabotta

RELATORE

Prof. Ing. Alessandro Rivola

CORRELATORE

Dott. Ing. Alberto Martini

Anno Accademico 2012/2013

Sessione III°



“... nel mezzo c'è tutto il resto  
e tutto il resto è giorno dopo giorno  
e giorno dopo giorno è  
silenziosamente costruire  
e costruire è sapere e potere  
rinunciare alla perfezione ...”

i miei genitori,  
Paola e Riccardo



# INDICE

<b>Introduzione</b>	<b>5</b>
<b>Capitolo 1</b>	<b>7</b>
PRESENTAZIONE AZIENDA PAGLIERANI S.R.L.	
1.1 La storia	7
1.2 Tecnologia	7
1.3 Produzione	8
1.4 Settori di applicazione	9
1.5 Servizi post-vendita	10
1.6 Paglierani nel mondo	10
<b>Capitolo 2</b>	<b>11</b>
INTRODUZIONE ALLA ROBOTICA E AGLI AZIONAMENTI ELETTRICI	
2.1 Introduzione alla robotica generale	11
2.2 Introduzione agli azionamenti elettrici	14
2.2.1 Struttura di un azionamento elettrico	14
2.2.2 Tecniche di controllo del moto	15
2.2.3 Problema termico per gli attuatori elettrici	16
2.2.4 Accoppiamento motore-carico	18
2.3 Motori Brushless	23
<b>Capitolo 3</b>	<b>27</b>
PRESENTAZIONE GENERALE DEL ROBOT “ANTROP”	
3.1 La pallettizzazione	27
3.2 Il manipolatore “Antrop”	32
3.2.1 Introduzione	32

3.2.2 Dimostrazione delle relazioni cinematiche tra pinza e attuatori	34
3.2.3 Spazio di lavoro	36
3.2.4 Motorizzazioni e organi di trasmissione	27
3.2.5 Parte elettrica ed elettronica del robot	43
3.2.6 Legge di moto degli attuatori del robot	43
<b>Capitolo 4</b>	<b>47</b>
<b>ANALISI CINEMATICA DEL MANIPOLATORE</b>	
<b>Capitolo 5</b>	<b>57</b>
<b>ANALISI DINAMICA DEL MANIPOLATORE</b>	
5.1 Dinamica relativa al piano (X,Y)	57
5.1.1 Analisi cinetostatica	57
5.1.2 Accoppiamento motore-riduttore-carico nella movimentazione x e y	70
5.2 Dinamica relativa alla rotazione della torretta	76
5.2.1 Analisi dinamica attraverso la legge di Newton	76
5.2.2 Accoppiamento motore-riduttore-carico nella movimentazione della torretta	79
<b>Capitolo 6</b>	<b>83</b>
<b>MAPPATURA ED ANALISI DATI</b>	
6.1 Mappatura relativa al piano (X,Y)	83
6.1.1 Impostazione generale	83
6.1.2 Raccolta dati della mappatura relativa al piano (X,Y)	86
6.2 Mappatura relativa alla rotazione della torretta	100
6.2.1 Impostazione generale	100
6.2.2 Raccolta dati della mappatura relativa alla rotazione della torretta	102
6.3 Analisi dati	109

<b>Capitolo 7</b>	<b>111</b>
ANALISI DELLE SOLLECITAZIONI	
7.1 Formulazione analitica degli sollecitazioni	111
7.2 Raccolta dati	115
<b>Capitolo 8</b>	<b>129</b>
PROPOSTE DI OTTIMIZZAZIONE	
8.1 Introduzione	129
8.2 Energia potenziale della robot	130
8.3 Bilanciamento con masse	133
8.4 Verifica dinamica del bilanciamento statico con masse	135
8.5 Bilanciamento con molle	141
8.6 Considerazioni finali	145
<b>Conclusioni</b>	<b>147</b>
<b>Appendice A</b>	<b>149</b>
SCRIPT MATLAB RELATIVO ALL'ANALISI CINEMATICA NEL PIANO (X,Y)	
<b>Appendice B</b>	<b>173</b>
SCRIPT MATLAB PER L'ANALISI DINAMICA RELATIVA AL PIANO (X,Y)	
<b>Appendice C</b>	<b>175</b>
SCRIPT MATLAB PER L'ANALISI DINAMICA RELATIVA ALLA ROTAZIONE DELLA TORRETTA	
<b>Appendice D</b>	<b>176</b>
SCRIPT MATLAB RELATIVO AGLI AZIONAMENTI ORIZZONTALI E VERTICALI	

<b>Appendice E</b>	<b>179</b>
SCRIPT MATLAB RELATIVO ALL'AZIONAMENTO DELLA TORRETTA	
<b>Appendice F</b>	<b>181</b>
SCRIPT MATLAB RELATIVO ALLE SOLLECITAZIONI	
<b>Appendice G</b>	<b>183</b>
SCRIPT MATLAB RELATIVO ALLA MAPPATURA NEL PIANO (X,Y)	
<b>Appendice H</b>	<b>189</b>
SCRIPT MATLAB RELATIVO ALLA MAPPATURA DELLA ROTAZIONE DELLA TORRETTA	
<b>Bibliografia</b>	<b>193</b>
<b>Ringraziamenti</b>	<b>195</b>

## Introduzione

La tesi è stata realizzata all'interno dell'azienda Paglierani S.r.l. con sede a Torriana. Alla base dell'elaborato c'è l'esigenza di studiare e ottimizzare dinamicamente il manipolatore "Antrop". Non essendo stato interamente progettato all'interno dell'azienda c'è la necessità di verificare che gli odierni attuatori elettrici siano adatti. Inoltre, questo bisogno nasce dal fatto che rispetto alla concorrenza il consumo elettrico del robot è molto più elevato a parità di ciclo di lavoro. Essendo queste le problematiche da affrontare, ci si è avvalsi dello strumento di calcolo Matlab per poter creare un modello matematico che potesse essere il più realistico possibile e dare risposte alle domande aziendali sorte.

Si ritiene particolarmente importante sottolineare che i primi tempi di realizzazione della tesi sono stati dedicati allo studio della robotica e all'approfondimento degli azionamenti elettrici, argomenti alla base dell'oggetto dell'elaborato stesso. E' interessante condividere la definizione della Robot Institute of America per il robot industriale: "un robot è una struttura meccanica multifunzionale e riprogrammabile progettato per spostare materiali, parti, utensili, o dispositivi specializzati secondo movimenti variabili programmati per l'esecuzione di una varietà di compiti diversi" <sup>[1]</sup>. Si intuisce chiaramente come la meccanica, l'elettronica, l'informatica e l'automatica siano tutte chiamate in causa quando si parla di un robot. In questa tesi ci si è concentrati maggiormente sulla parte meccanica, ma è stato impossibile non interessarsi anche della altre discipline per comprendere a fondo il funzionamento della macchina.

L'elaborato è così suddiviso. Nel capitolo 1 viene brevemente descritta l'azienda e la sua storia. E' possibile apprezzare la varietà di macchinare che realizza e i settori di applicazione di queste. Il secondo capitolo racchiude le informazioni più importanti e utili sulla robotica e sugli azionamenti elettrici. Queste nozioni verranno sfruttate durante lo svolgimento dell'elaborato stesso. Nel capitolo 3 è descritto in modo

dettagliato il robot, le sue funzionalità e le sue caratteristiche meccaniche. Il capitolo 4 è dedicato all'analisi cinematica. Nel capitolo 5 viene curata l'analisi dinamica, suddivisa in due parti a causa della geometria cilindrica del manipolatore. Il sesto capitolo contiene il procedimento di mappatura e la logica con cui è stato scritto. Inoltre, vengono presentati i risultati dei test e le conseguenti considerazioni. Nel capitolo settimo è descritta la formulazione analitica delle sollecitazioni per le leve del robot e ne vengono raffigurati i risultati generali. L'ultimo e ottavo capitolo è dedicato al bilanciamento statico con masse e molle.

# Capitolo 1

## PRESENTAZIONE AZIENDA PAGLIERANI S.R.L.

### 1.1 La storia

Fondata nel 1926 da Fernando Paglierani, pioniere dell'imprenditoria italiana, l'Azienda si è affermata prima sul mercato italiano e poi su quello internazionale.

Una lunga tradizione di successi dovuta alla continua ricerca di soluzioni innovative sia sulle singole macchine che sulle linee complete per la pesatura, per il confezionamento, la palettizzazione, avvolgitura ed incappucciamento di pallet pieni.

Oggi, Paglierani è un nome conosciuto ed apprezzato in tutto il mondo. Le aumentate richieste da parte dei mercati internazionali hanno poi sollecitato un potenziamento della produttività e l'apertura di nuovi stabilimenti. Per questo è stata realizzata un'unità operativa riservata esclusivamente alla costruzione della carpenteria metallica e, qualche anno dopo, ha avuto luogo l'acquisizione di un'azienda leader nel settore della palettizzazione.

Già negli anni '80 l'azienda diventa leader in Europa per la fornitura di linee complete. Nei decenni l'impulso al potenziamento non è andato spegnendosi: vengono implementati i reparti produttivi per confermare ed estendere un primato inossidabile.

### 1.2 Tecnologia

Oggi la Paglierani è una realtà produttiva solida e al passo con le richieste del terzo millennio.

6 stabilimenti specializzati, distribuiti al Centro e al Nord Italia su una superficie di 29000 mq., provvedono alla specifica manifattura di macchinari ad alto contenuto tecnologico e dalle ottime prestazioni.

Il laboratorio interno Paglierani Elettronica, certificato ISO 9001, deputato alla ricerca e all'esecuzione dei test metrologici ne garantisce la conformità alle più rigide normative internazionali.

La Paglierani è certamente l'unica azienda a livello mondiale che garantisce la progettazione, la manifattura, il montaggio, il collaudo ed il servizio postvendita dei macchinari e delle linee da essa prodotti.

### 1.3 Produzione

La qualità Paglierani e l'alta specializzazione tecnologica che accompagna ogni fase della produzione si ritrovano immutati sia a livello della singola applicazione che sulla linea completa chiavi in mano.

La scelta della flessibilità di impiego garantisce la massima efficienza in ciascun contesto e un adattamento ottimale alle richieste del cliente.

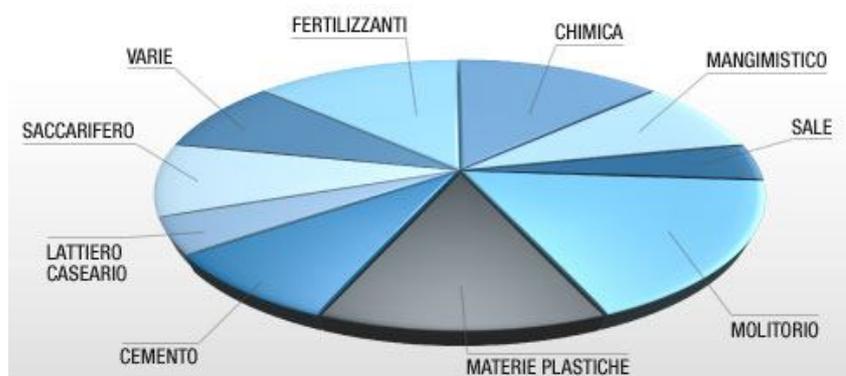
Un'ampia gamma di prodotti dalle prestazioni uniche, progettati per offrire sicurezza ed elevato rendimento.

			
Pesatrice per controllo processo ND	Pesatrice per insacco	Confezionatrice per piccoli sacchetti in materiale plastico (form fill and seal)	Confezionatrice per piccoli sacchetti preformati
			
Pesatrici - insaccatrici elettroniche a peso lordo	Insaccatrice a coclea verticale per sacchi a bocca aperta	Insacco per sacchi a bocca aperta	Presentatore automatico di sacchi a bocca aperta

			
Linea di chiusura per sacchi a bocca aperta	Unità mobili di insacco (in container)	Linea automatica di riempimento per sacchi a bocca aperta	Insacatrici per sacchi a valvola
			
Presentatore automatico di sacchi a valvola	Insacatrice "form fill and seal" per grandi sacchi	Pesatrice riempitrice per big bags	Sistema controllapeso e metal detector
			
Palettizzatore antropomorfo per sacchi fardelli e sacchi	Palettizzatore per sacchi, scatole e fardelli	Avvolgitore per film estensibile	Incappucciato per film estensibile

**Tabella 1.1: macchine realizzate in Paglierani.**

## 1.4 Settori di applicazione



**Figura 1.1: grafico a torta dei settori di applicazione.**

Sono sempre più numerosi i clienti che, in tutto il mondo, scelgono di affidarsi a Paglierani per la gestione dei loro prodotti.

L'idea originaria, nata per migliorare i risultati nel settore cementifero, ha ampliato notevolmente le sue possibilità di applicazione, confermandosi la soluzione vincente per confezionare ogni genere di prodotti.

Un risultato che giunge a conferma del notevole impegno dedicato in questi anni alla ricerca e all'aggiornamento costante.

## **1.5 Servizi post-vendita**

L'affidabilità di un'azienda si vede anche dal servizio post-vendita che è in grado di fornire ai suoi clienti. Paglierani riserva all'assistenza e all'organizzazione della ricambistica la stessa precisione ed efficienza che caratterizzano la fase progettuale e produttiva. Una catena di magazzini-ricambi informatizzati, estesi su una superficie di oltre 2800 mq<sup>2</sup> provvede ad esaudire con la massima celerità ogni richiesta. La gestione del servizio, sia "on-line" che "in campo" è affidata alla competenza di tecnici altamente specializzati in grado di valutare le soluzioni più convenienti ed appropriate: assemblatori di linee, strumentisti, manutentori, collaudatori.

Oltre il 95% della ricambistica è a stock e viene garantita per oltre 20 anni.

## **1.6 Paglierani nel mondo**

L'impulso alla crescita, la ricerca di soluzioni specializzate e diversificate rispetto al mercato, gli ausili tecnologici sempre più all'avanguardia, i vantaggi introdotti nel ciclo produttivo hanno portato l'azienda ad affermarsi in 32 nazioni dei 5 continenti, conquistando una posizione indiscussa di leader internazionale. Un successo lungo quasi un secolo e grande come il mondo.

## Capitolo 2

### INTRODUZIONE ALLA ROBOTICA E AGLI AZIONAMENTI ELETTRICI

#### 2.1 Introduzione alla robotica generale <sup>[1]</sup>

La robotica industriale è la disciplina che si occupa della progettazione, del governo e delle applicazioni dei robot all'interno dei sistemi automatizzati.

Il robot industriale è adatto per eseguire tre operazioni fondamentali: trasporto, manipolazione e misura.

Riprendendo la definizione di robot industriale proposto nell'introduzione, è bene soffermarsi sulle caratteristiche di multifunzionalità e riprogrammabilità. Queste dipendono dal livello di automazione del robot.

L'automazione rigida: movimentazioni sequenziali obbligate adatte ad un contesto di produzione industriale di grossi volumi, con requisiti di elevata produttività e qualità del prodotto.

L'automazione programmabile: ideale per produzioni di piccoli e medi lotti. Esiste la possibilità di alterare con relativa facilità le sequenze delle operazioni da eseguire. Macchine maggiormente versatili e in grado di effettuare lavorazioni su oggetti diversi appartenenti alla stessa tecnologia di gruppo.

L'automazione flessibile: nasce per produzioni con un'ampia gamma di varietà di prodotti. Necessita di una forte integrazione della tecnologia informatica con quelle industriali.

I componenti che formano un robot industriale sono:

- **Struttura meccanica o manipolatore:** l'insieme di bracci interconnessi da giunti. Nel manipolatore si individuano una struttura portante, che ne assicura mobilità, un polso, che

conferisce destrezza, e un organo terminale che esegue il compito per cui il robot è utilizzato.

- Attuatori: imprimono movimento al manipolatore. Posso essere elettrici, idraulici o pneumatici.
- Sensori: misurano grandezze fisiche sia del robot che dell'ambiente esterno. Sono le parti "sensibili" del robot
- Unità di governo: svolge le funzioni di controllo e supervisione dei movimenti del robot.

La struttura fondamentale dei manipolatori è a catena cinematica aperta, cioè quando vi è una sola sequenza di bracci che connette i due estremi della catena. Alternativamente, un manipolatore contiene una catena cinematica chiusa quando una sequenza di bracci forma un anello. La mobilità di un manipolatore è assicurata dalla presenza di giunti rotoidali o prismatici.

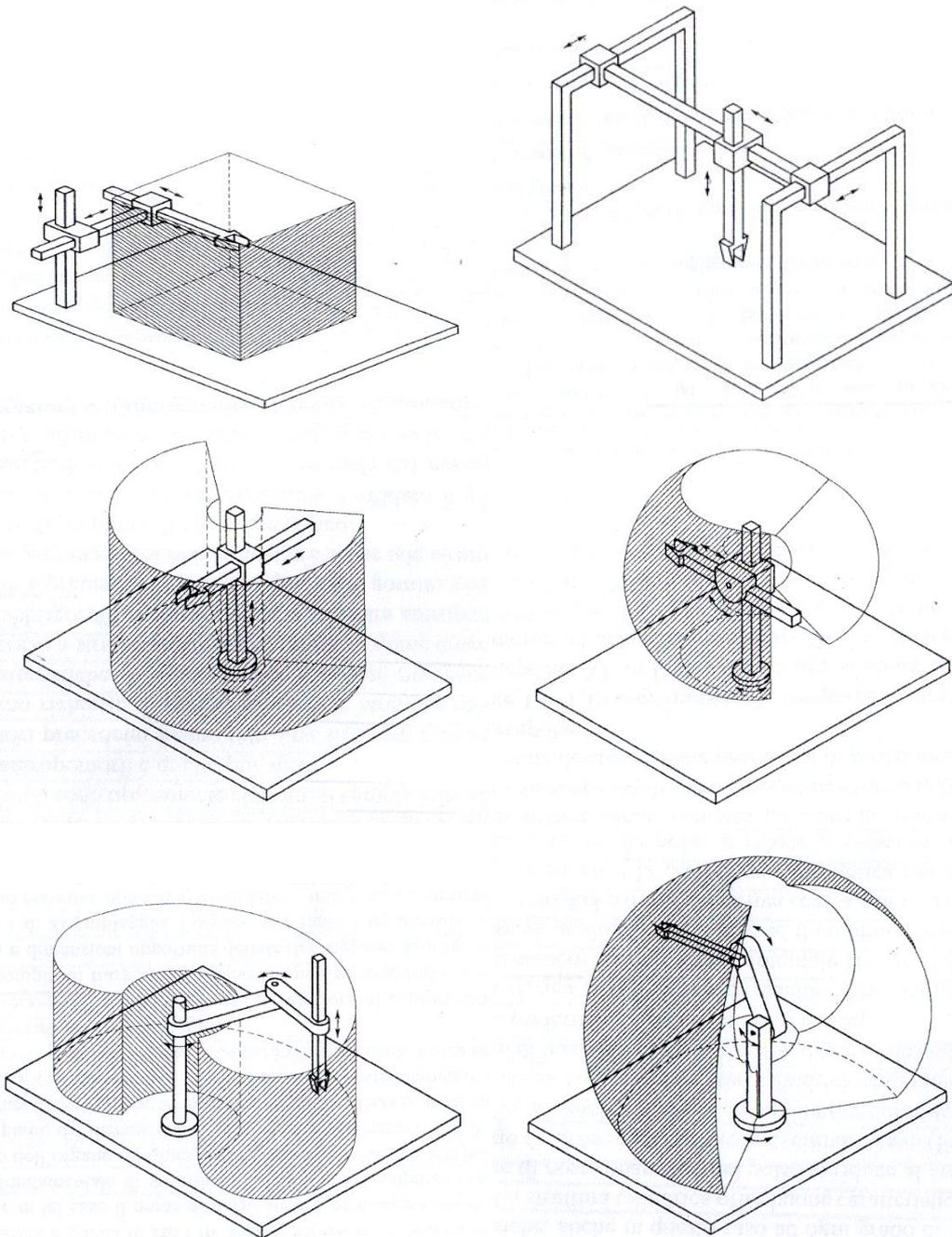
I gradi di mobilità devono fornire i gradi di libertà richiesti per l'esecuzione di un dato compito. Nel caso più generale di un compito che consiste nel posizionare e orientare arbitrariamente un oggetto nello spazio tridimensionale, i gradi di libertà richiesti sono sei, tre per posizionare un punto dell'oggetto e tre per orientarlo rispetto ad una terna di coordinate di riferimento. Se si hanno più gradi di mobilità rispetto ai gradi di libertà, il manipolatore si dice ridondante da un punto di vista cinematico.

Lo spazio di lavoro rappresenta la posizione dell'ambiente circostante a cui può accedere l'organo terminale di un manipolatore. La sua forma e il suo volume dipendono dalla struttura del manipolatore e dalla presenza di fine-corsa ai giunti.

In base al tipo e alla successione dei gradi di mobilità della struttura portante è possibile classificare i manipolatori in:

- Geometria cartesiana: composta da tre giunti prismatici, usualmente ortogonali tra loro.
- Geometria cilindrica: composta da due giunti prismatici e un giunto rotoidale.
- Geometria sferica: composta da un giunto prismatico e due giunti rotoidali.

- Geometria SCARA: composta da un giunto prismatico e due giunti rotoidali disposti in modo tale che gli assi di moto siano tutti paralleli.
- Geometria antropomorfa: composta da tre giunti rotoidali.



**Figura 2.1: in alto a sinistra: manipolatore cartesiano. In alto a destra: manipolatore a portale. In centro a sinistra: manipolatore cilindrico. In centro a destra: manipolatore sferico. In basso a sinistra: manipolatore SCARA. In basso a destra: manipolatore antropomorfo.**

I manipolatori appena esposti sono tutti con struttura a catena cinematica aperta. Quando sono richieste portate elevate si assumono strutture a catena cinematica chiusa per conferire rigidità e precisione anche in condizioni critiche di carico.

L'organo terminale viene specificato in relazione al compito che il robot deve eseguire. Può essere una pinza nel caso di trasporto di materiale, un utensile o un dispositivo specializzato nel caso di compiti di lavorazione e di assemblaggio.

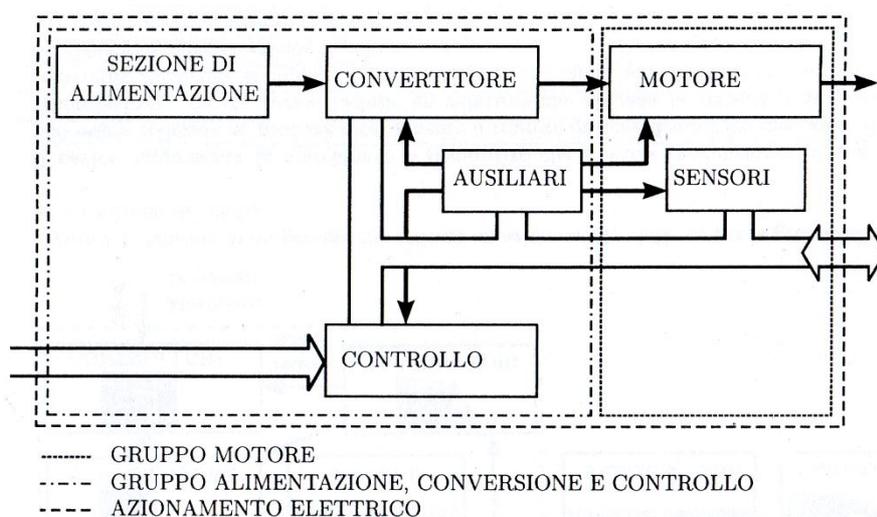
## 2.2 Introduzione agli azionamenti elettrici <sup>[2]</sup>

### 2.2.1 Struttura di un azionamento elettrico

Tra i principali attuatori adoperati in robotica vi troviamo gli azionamenti elettrici.

L'azionamento elettrico, come si può vedere in figura 2.2, è composto da due parti principali:

- Gruppo di Alimentazione, Conversione e Controllo: esso è costituito da una sezione di alimentazione, un modulo di conversione e controllo e dagli ausiliari.
- Gruppo Motore: esso comprende il motore elettrico, i sensori e le protezioni e gli ausiliari del motore.

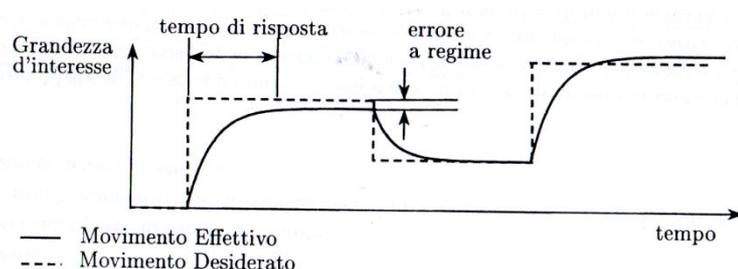


**Figura 2.2: struttura di un azionamento elettrico secondo la normativa CEI 301-1.**

Dalla figura 2.2 si può vedere come il movimento desiderato dall'utente sia inserito all'interno del controllore. Questa informazione viene inviata al convertitore che prelevando energia dalla rete elettrica e trasformandola in modo adeguato fornisce potenza elettrica al motore. Il motore compie un certo movimento che viene rilevato dai trasduttori. Questi, a loro volta, mandano un segnale al controllore che confronta il segnale dei trasduttori con il movimento desiderato e corregge automaticamente il segnale al convertitore.

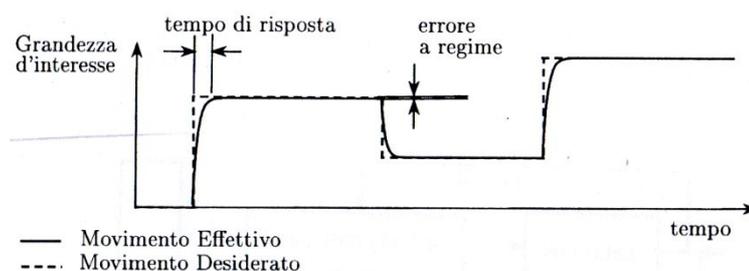
### 2.2.2 Tecniche di controllo del moto

Il controllo del moto nei sistemi automatici può avvenire in tre modi differenti: per variazione rappresenta la situazione in cui un parametro è normalmente costante ed occasionalmente se ne vuole variare il valore e non si richiede una notevole precisione né in termini di tempi di assestamento né in di errore a regime.



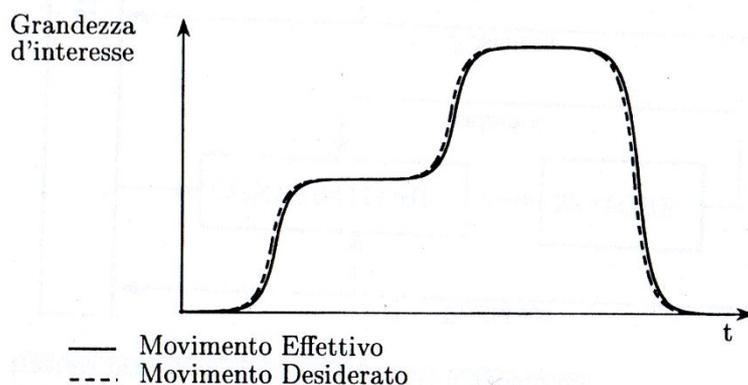
**Figura 2.3: esempio di controllo del moto per variazione.**

Per regolazione s'intende il caso in cui si vuole imporre un valore desiderato alla grandezza d'uscita, mantenendo, però, sotto controllo sia il tempo di assestamento, sia l'errore a regime. Tali grandezze devono essere comprese entro delle tolleranze definite in fase progettuale.



**Figura 2.4: esempio di controllo del moto per regolazione.**

Per inseguimento s'intende la capacità di un sistema automatico di seguire con precisione un riferimento ad elevata dinamica, cioè rapidamente variabile. Questi sistemi sono detti anche servosistemi e sono i tipici attuatori elettrici presenti in robotica.



**Figura 2.5: esempio di controllo del moto per inseguimento.**

Dopo aver descritto il modo con cui controllare il moto, viene definito che cosa si può controllare:

- Controllo di velocità: con variazione o regolazione, manuale o automatica.
- Controllo di posizione: con regolazione o inseguimento.
- Controllo di coppia: con inseguimento

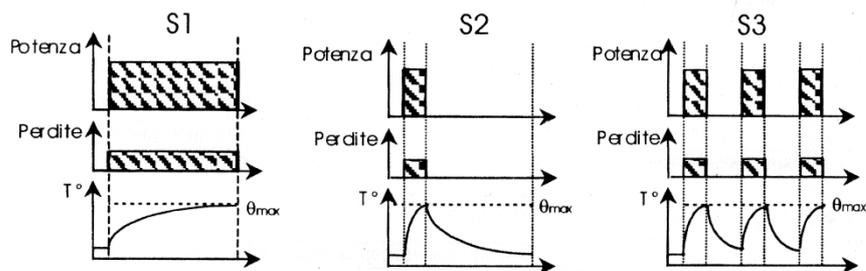
### **2.2.3 Problema termico per gli attuatori elettrici**

L'andamento temporale della potenza richiesta viene detto ciclo di carico ed è indispensabile per la definizione del tipo di servizio richiesto dal motore. La conoscenza del ciclo di carico è necessaria per la determinazione della taglia del motore da impiegare nell'applicazione. Le norme internazionali e nazionali distinguono diverse condizioni di servizio standard indicate dalla lettera S seguita da un numero. I principali servizi previsti sono:

- S1: servizio continuo. Il motore eroga sempre lo stesso valore di potenza per un periodo di tempo molto lungo e sufficiente perché venga raggiunto l'equilibrio termico. La temperatura di regime non deve essere superiore a quella massima ammessa in relazione

alle condizioni ambientali di lavoro. E' questo tipo di servizio che consente di definire il valore limite della coppia continuativa e, in corrispondenza di una determinata velocità base, il valore della coppia nominale.

- S2: servizio di durata limitata. Funzionamento a carico costante per un periodo di tempo  $t_a$  (tempo di erogazione potenza) inferiore a quello richiesto per raggiungere l'equilibrio termico, seguito da un tempo di riposo (cioè con motore non più alimentato) sufficiente per riportare il motore alla temperatura ambiente; va precisato il tempo di funzionamento a carico, ad esempio per cicli di 30 minuti si indica la sigla S2:30.
- S3: servizio intermittente periodico. Funzionamento secondo una serie di cicli identici, ognuno comprendente un determinato tempo di funzionamento a carico costante e una tempo di riposo. Il servizio S3 si può definire mediante il rapporto "di intermittenza" tra il tempo di funzionamento a carico ed il tempo di ciclo ed è generalmente espresso in percentuale (ad es. S3:25%); sovente il costruttore fornisce delle curve limite nel piano  $C_m, \omega_m$  che racchiudono i campi di funzionamento S3 corrispondenti ad una serie standard di rapporti d'intermittenza (15%,25%,40%,60%).



**Figura 2.6: andamenti temporali dei servizi S1, S2 e S3.**

Altri tipi di servizi che prevedono le norme sono:

- S4: servizio intermittente periodico con avviamenti che influenzano il riscaldamento del motore. Analogo a S3, ma con avviamenti che producono significative coppie d'inerzia e quindi consistenti perdite per effetto Joule.

- S5: servizio intermittente periodico con avviamenti e frenate che influenzano il riscaldamento del motore. Come S4, ma con frenatura elettrica.
- S6: servizio ininterrotto periodico con carico intermittente. Analogo al servizio S3, ma il motore non viene arrestato. Differisce da S3 se il motore a vuoto produce calore significativo. I cicli di lavoro si intendono di 10 minuti salvo indicazione diversa. La durata del tempo di lavoro è indicata in percentuale: 15%, 25%, 40%, 60%.
- S7: servizio ininterrotto periodico con avviamenti e frenate elettriche. Analogo a S5, ma senza periodo di riposo. Nell'indicare le prestazioni, va indicato il fattore di inerzia  $F_i$  ed il carico durante il periodo di lavoro cui ci si riferisce.
- S8: servizio ininterrotto periodico con variazioni del carico e della velocità tra loro correlati. Va indicato il fattore di inerzia  $F_i$  ed il carico durante il periodo di lavoro.
- S9: servizio continuo a velocità e carico variabile.

La sovratemperatura massima ammessa è funzione della qualità del materiale isolante degli avvolgimenti elettrici individuata dalla classe di isolamento. Le principali classi di isolamento previste dalle norme tecniche sono:

- Classe E:  $75^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ .
- Classe B:  $80^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ .
- Classe F:  $100^{\circ}\text{C} \pm 15^{\circ}\text{C}$ .
- Classe H:  $125^{\circ}\text{C} \pm 15^{\circ}\text{C}$ .

Queste temperature si riferiscono ad una temperatura esterna uguale a  $40^{\circ}\text{C}$ .

#### **2.2.4 Accoppiamento motore-carico**

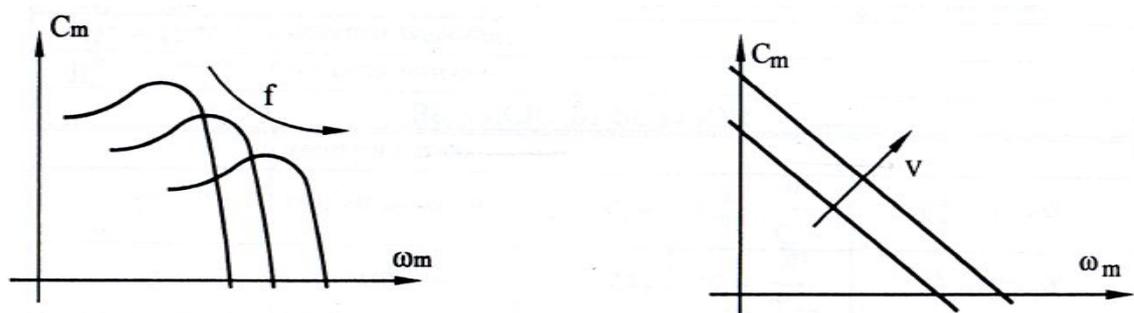
La funzionalità principale di un motore elettrico è quello di muovere un utilizzatore. E' quindi fondamentale studiare l'accoppiamento motore-carico partendo da alcune definizioni importanti. La prima che vado a presentare è la caratteristica meccanica del motore, cioè la relazione tra coppia e velocità per prefissati valori di tensione, corrente, frequenza,

resistenza, etc. Le curve caratteristiche consentono di studiare la macchina quando procede a velocità costante. Negli altri casi è necessario considerare altri fattori meccanici o elettrici caratteristici di ogni tipo di azionamento elettrico. Quando si parla di velocità di un motore tipicamente si fa riferimento o alla velocità nominale per il quale è stato ottimizzato il progetto del motore, oppure alla velocità a vuoto, ossia la velocità che il motore assume senza alcun carico.



**Figura 2.7: esempi di curve di coppia di motore asincrono (sinistra) e motore a corrente continua (destra); definizione di coppia di spunto  $C_s$ , coppia massima  $C_{max}$  e velocità a vuoto  $\omega_0$  (di sincronismo)**

La velocità che il motore può assumere può essere significativamente diverso dai valori nominali e questo può dipendere o dalla coppia richiesta dal carico o dai valori dei parametri di regolazione. La curva può deformarsi qualora vengano modificati i parametri di regolazione come ad esempio tensione, corrente, frequenza, resistenza, ecc.



**Figura 2.8: a sinistra motore asincrono regolato in frequenza. A destra motore a corrente continua regolato in tensione.**

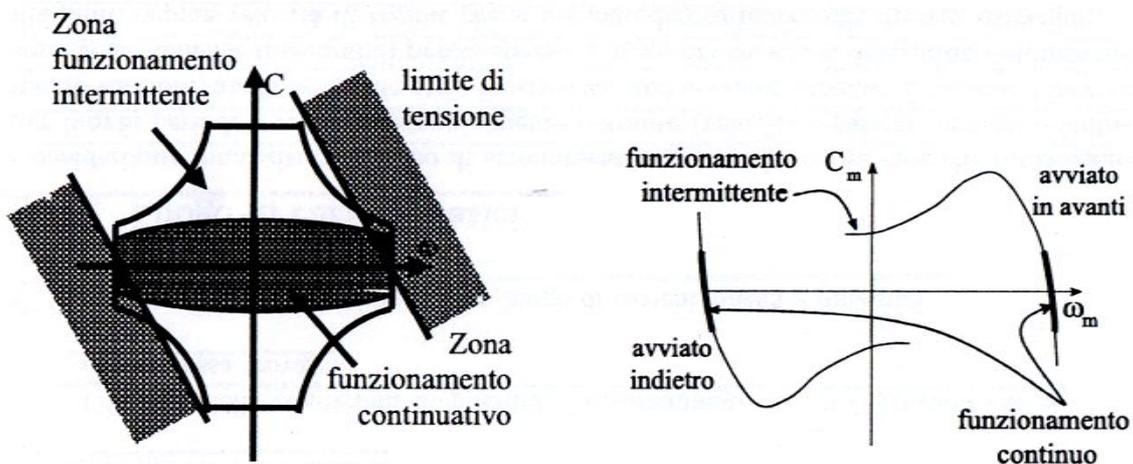
In linea generale, assegnato un verso positivo per la coppia e la velocità, un motore potrebbe funzionare su tutti e quattro i quadranti del del piano cartesiano  $(\omega_m, C_m)$ . Definita  $W = C_m * \omega_m$  la potenza meccanica

generata al motore, dal punto di vista meccanico, si possono individuare i seguenti modi di funzionamento:

- 1° e 3° quadrante,  $W > 0$ , coppia e velocità concordi: motore.
- 2° e 4° quadrante,  $W < 0$ , coppia e velocità discordi: freno.

Si distingue la frenatura dissipativa da quella rigenerativa. In quest'ultimo caso il motore diventa un generatore elettrico.

Facendo variare il valore di tutti i parametri di regolazione, la curva caratteristica si modifica e spazza una porzione di piano  $(\omega_m, C_m)$ . L'area spazzata rappresenta l'insieme dei punti di funzionamento del motore e viene definito campo operativo del motore. Questo si può suddividere in due zone: la prima è la zona di funzionamento continuativo e rappresenta le condizioni in cui il motore può funzionare per un tempo indefinito; la seconda è la zona di funzionamento intermittente e rappresenta le condizioni in cui il motore può lavorare per tempi limitati per evitare surriscaldamenti pericolosi. Il campo operativo è ovviamente differente per ogni tipo di motore.



**Figura 2.9: a sinistra il campo operativo di un motore a corrente continua a collettore. A destra il campo operativo di un motore asincrono alimentato direttamente da rete.**

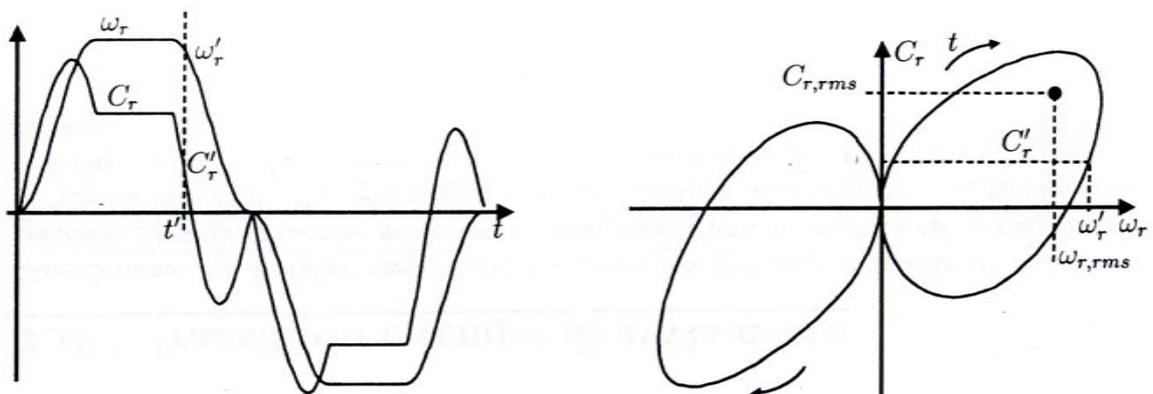
Nel studio di un accoppiamento motore-carico è conveniente descrivere anche la curva caratteristica del carico, ossia il legame tra velocità e coppia resistente. Tipicamente si distinguono tra casi importanti di carico:

- Carichi statici a velocità costante: il motore funziona sempre in condizioni di velocità costante prefissata ed il carico varia occasionalmente entro valori prefissati.
- Carichi statici a velocità regolabile: il motore funziona con variazioni di velocità lente e saltuarie ed il carico varia occasionalmente entro valori prefissati.
- Carichi dinamici: velocità e coppia resistente possono variare anche repentinamente.

Similmente al motore, anche il carico può lavorare su tutti e quattro i quadranti del piano cartesiano ( $\omega_r, C_r$ ). . Definita  $W = C_r * \omega_r$  la potenza meccanica resistente, dal punto di vista meccanico, si possono individuare i seguenti modi di funzionamento:

- 1° e 3° quadrante,  $W > 0$ , coppia e velocità concordi: coppia passiva.
- 2° e 4° quadrante,  $W < 0$ , coppia e velocità discordi: coppia motore.

L'insieme delle condizioni di carico è definito luogo dei carichi. E' però conveniente distinguere il luogo dei carichi statici dal luogo dei carichi dinamici. Il primo si riferisce alle applicazioni in cui velocità e carico sono costanti o leggermente variabili. Il secondo si riferisce invece al caso in cui velocità e carico cambiano in continuazione, situazione tipica delle macchine automatiche o dei robot.

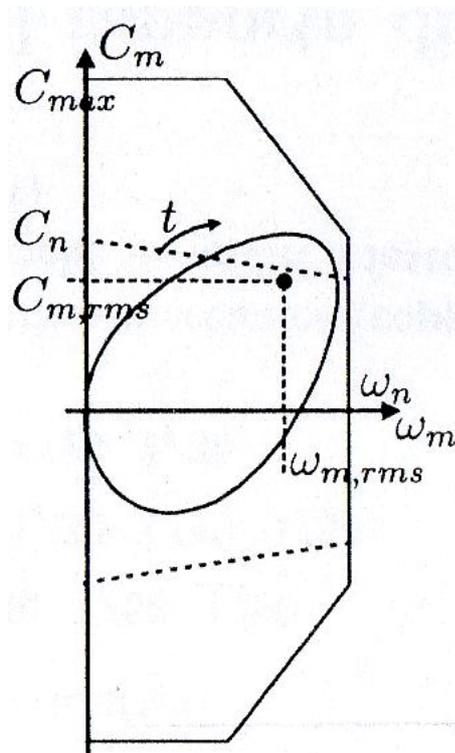


**Figura 2.10: a sinistra un esempio di andamento di coppia e velocità di un servosistema. A destra un esempio di luogo dei carichi dinamici di un servosistema.**

Oltre alla curva di carico si definisce anche un punto  $C_{r,rms}-\omega_{r,rms}$  le cui coordinate sono i valori quadratici medi di coppia e velocità. Questi due valori rappresentano la coppia e la velocità “equivalenti termiche”. Quando le curve caratteristiche del motore e del carico vengono inseriti in modo corretto nello stesso piano cartesiano, il punto equivalente termico deve trovarsi nella zona di funzionamento continuativo per assicurarsi che il motore non si scaldi eccessivamente.

$$C_{r,rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T C_r^2 dt} \quad (2.1)$$

$$\omega_{r,rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \omega_r^2 dt} \quad (2.2)$$



**Figura 2.11: esempio di sovrapposizione del luogo dei carichi con il campo operativo di un motore.**

## 2.3 Motori Brushless

A favore di una maggiore chiarezza sulle argomentazioni successive, preme inserire una breve presentazione dei motori brushless dato che sono gli attuatori installati sul robot manipolatore Antrop. Essi sono motori di tipo sincrono alimentati attraverso un apposito circuito elettronico in grado di variare a piacere la frequenza di alimentazione e quindi la velocità. Statore e rotore nei motori sincroni a commutazione elettronica sono così strutturati:

- Sullo statore sono presenti avvolgimenti trifase che, opportunamente alimentati, possono generare un campo magnetico rotante d'intensità e orientamento arbitrari.
- Sul rotore sono presenti magneti permanenti con alta densità di campo ed alta forza coercitiva.

La commutazione della corrente nelle fasi non è ottenuta tramite le spazzole ed il collettore, ma tramite il trasduttore di posizione angolare ed un circuito elettronico.

Queste variazioni rispetto agli altri tipi di motore apportano numerosi benefici al motore, che schematicamente sono:

- Riduzione delle perdite per attrito (eliminazione spazzole).
- Eliminazione del collettore e di tutti i problemi connessi (usura, scintillio, resistenza elettrica...).
- Migliore smaltimento del calore sia sullo statore che sul rotore.
- Minore inerzia del rotore, quindi maggiore accelerazione.
- Minori limitazioni di coppia dovute alla velocità.

Tutto ciò ovviamente ad un costo elevato anche per la necessità del trasduttore di posizione e del circuito elettronico da impiegarsi obbligatoriamente anche quando il motore non richiede di essere regolato.

Esistono due tipi di motore brushless:

- A f.c.e.m. sinusoidale ("A.C. brushless").
- A f.c.e.m. trapezoidale ("D.C. brushless").

È interessante rispetto all'oggetto dello studio della tesi analizzare la prima tipologia. Senza entrare nei dettagli del funzionamento elettrico, è necessario dire che, indicando con  $I$  la corrente efficace di fase del

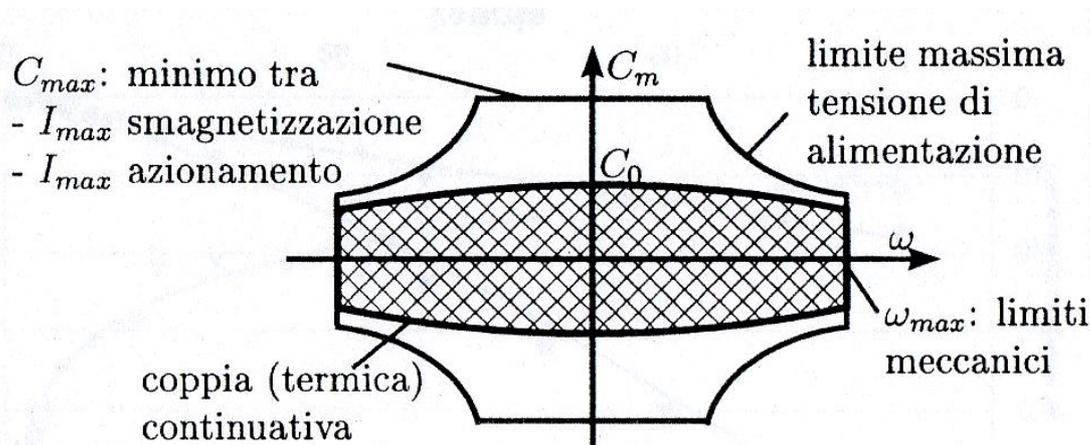
motore e con  $C$  la coppia motrice, si chiama costante di coppia  $K_t$  quella costante che in condizioni stazionarie soddisfa alla seguente relazione:

$$C = K_t * I \quad (2.3)$$

La costante di tensione  $K_e$  mette, invece, in relazione la velocità angolare con la forza controlettromotrice efficace concatenata:

$$V = K_e * \omega \quad (2.4)$$

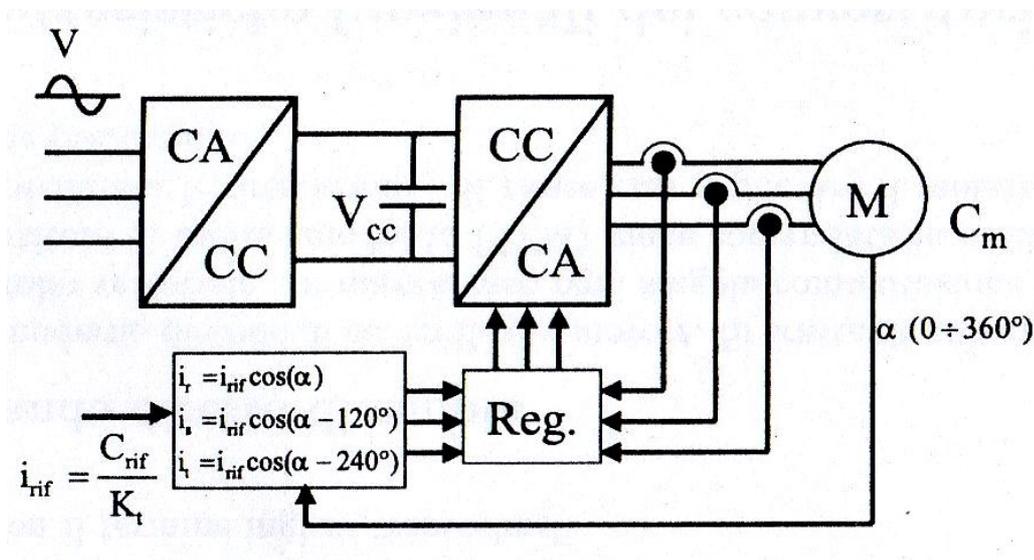
Anche per i motori brushless possiamo definire due campi di lavoro: intermittente e continuativo. Le velocità massime dipendono essenzialmente da fenomeni meccanici, mentre il limite di coppia continuativa è determinato da fenomeni termici. Il campo di funzionamento con coppia intermittente ha una limitazione superiore dovuta alla corrente massima. Allorché un motore viene accoppiato ad un convertitore nascono ulteriori limitazioni. La prima di corrente massima di picco e continuativa fornibile dal motore. La seconda di tensione massima che provoca, quindi, un limite di coppia massima di picco alle alte velocità.



**Figura 2.12: campo operativo continuativo ed intermittente di un motore brushless.**

Lo schema funzionale di un convertitore per motori sincroni è quello riportato in figura 2.12. La tensione di rete viene raddrizzata ottenendo

un BUS a c.c. che alimenta l'inverter d'uscita. La sezione c.a./c.c. prevede talvolta il modulo di recupero di energia elettrica. L'inverter di uscita funzionante con tecnica PWM è comandato da appositi circuiti che elaborano le richieste di coppia, velocità e posizione. Le elaborazioni tengono conto delle misure di velocità e posizione ottenute con appositi trasduttori. A livello base il convertitore pilota il motore in corrente (controllo di coppia) e le regolazioni di velocità si ottengono con opportuni anelli in retroazione.



**Figura 2.13: schema funzionale di un azionamento per motori sincroni a commutazione elettronica.**

La taglia di ogni convertitore viene rappresentata da due valori di corrente (e quindi di coppia), quello continuativo e quello di picco. Il rapporto tra questi valori è spesso un fattore 2.



## Capitolo 3

### PRESENTAZIONE GENERALE DEL ROBOT “ANTROP”

#### 3.1 La pallettizzazione

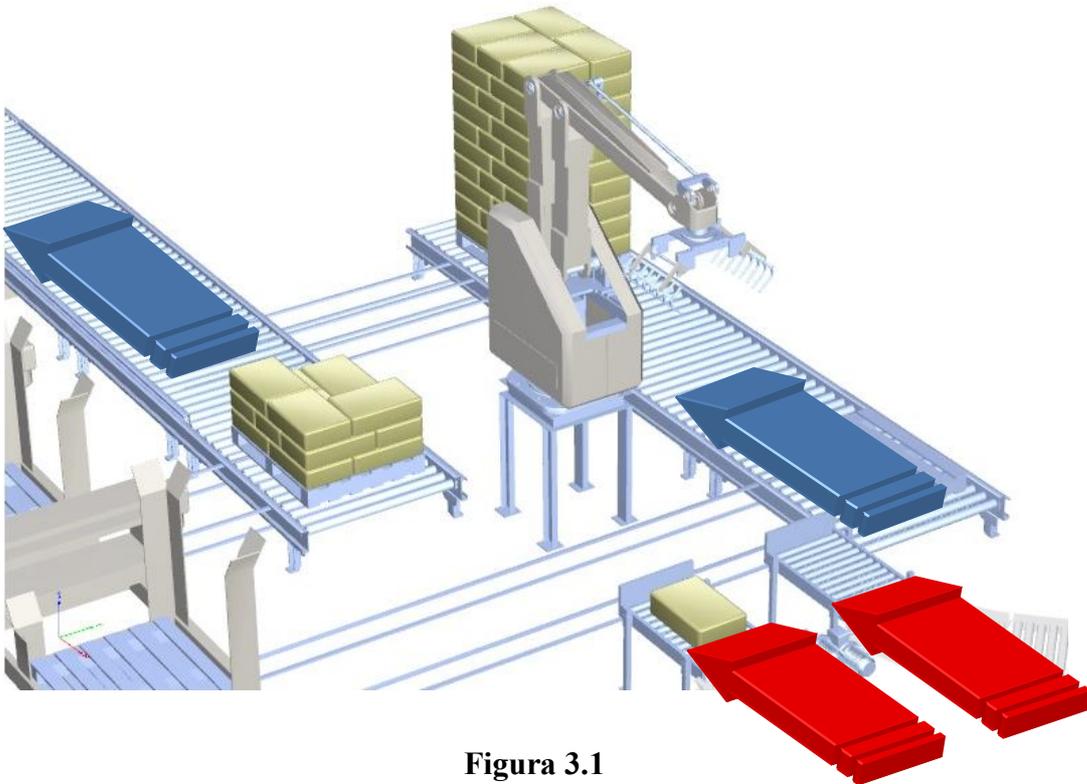
La pallettizzazione consiste nell'impilamento ordinato di elementi (casce, scatole, sacchi...) sopra un pallet. L'impilamento si definisce ordinato quando la disposizione degli elementi nei vari strati viene studiato in modo tale da evitare il ribaltamento degli stessi o durante la movimentazione del pallet o a causa della sola forza peso.

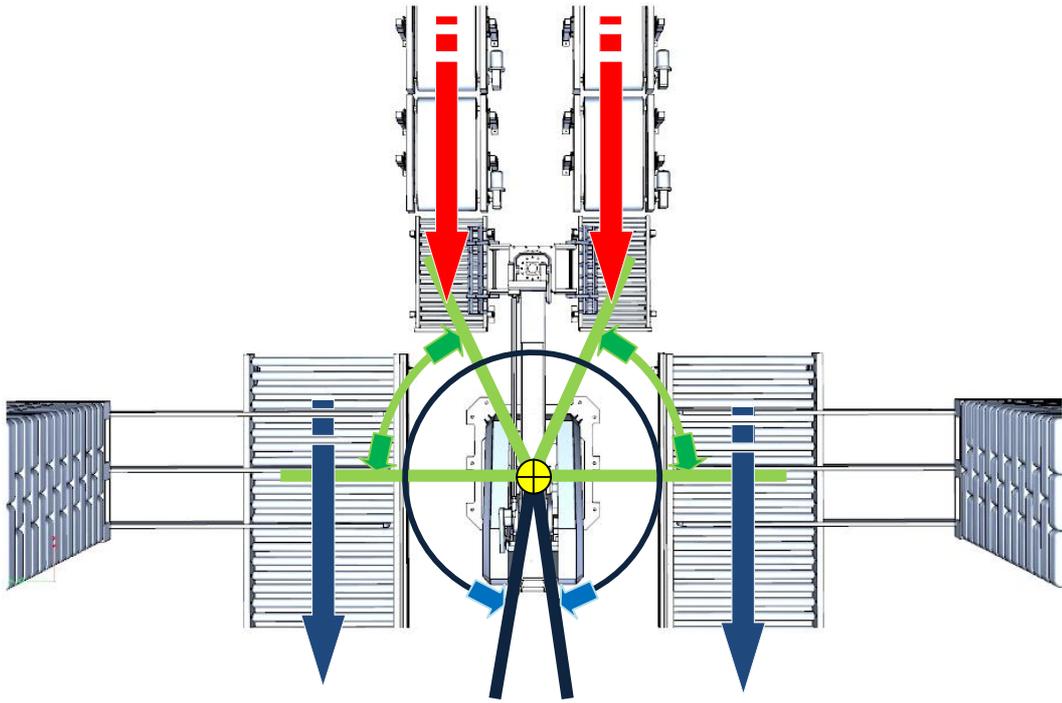
La pallettizzazione può essere effettuata sia manualmente che automaticamente mediante l'utilizzo di un robot pallettizzatore. L'operazione, in linea generale, viene eseguita da soggetti umani solo nel caso in cui i prodotti confezionati non superino un peso complessivo superiore a 10/12 Kg. In tutti gli altri casi si preferisce utilizzare un robot pallettizzatore. L'installazione di un sistema di pallettizzazione robotizzato aumenta la produttività e la flessibilità riducendo al contempo pericolose e pesanti operazioni di sollevamento da parte di soggetti umani.

Un manipolatore può essere inserito all'interno dei più svariati impianti di produzione. E' bene, quindi, definire le variabili logistiche che il programmatore deve conoscere per poter costruire i cicli di lavoro più adatti e convenienti per il robot e per l'impianto.

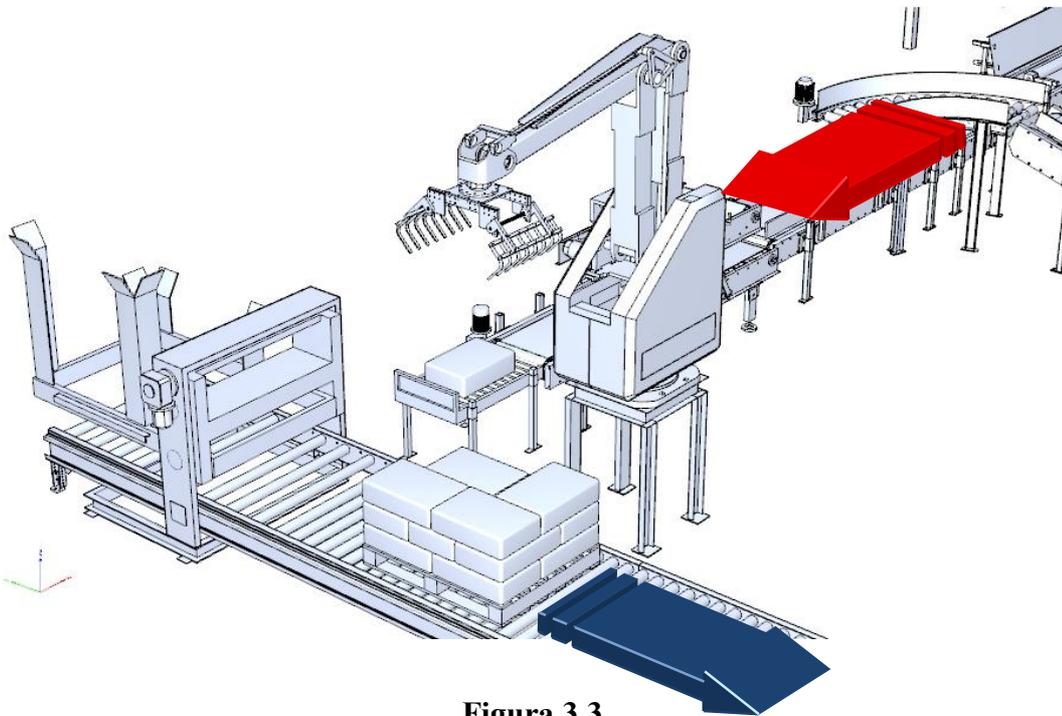
- Numero linee di ingresso: gli elementi possono essere presentati al robot da uno o più ingressi.
- Numero linee di uscita: i pallet possono essere presentati al robot da uno o più uscite.
- Presenza e numero di magazzini falde.
- Presenza e numero di magazzino pallet.
- Altezza del basamento del robot.
- Altezza dei singoli ingressi.

- Altezza delle singole uscite.
  - Altezza del magazzino falde.
  - Altezza del magazzino pallet.
  - Dimensioni del prodotto.
  - Peso del prodotto.
  - Orientazione e posizione del prodotto nelle piste di ingresso.
  - Posizione angolare delle linee di ingresso rispetto al robot.
  - Posizione angolare delle linee di uscita rispetto al robot.
  - Presenza e posizione di ostacoli rispetto al robot.
  - Capacità di produzione (elementi al minuto, elementi all'ora ecc).
- Sono riportati qui di seguito alcuni esempi illustrativi che raffigurano il robot pallettizzatore all'interno di un impianto. Vengono indicate con delle frecce rosse le linee di ingresso e in blu le linee di uscita.

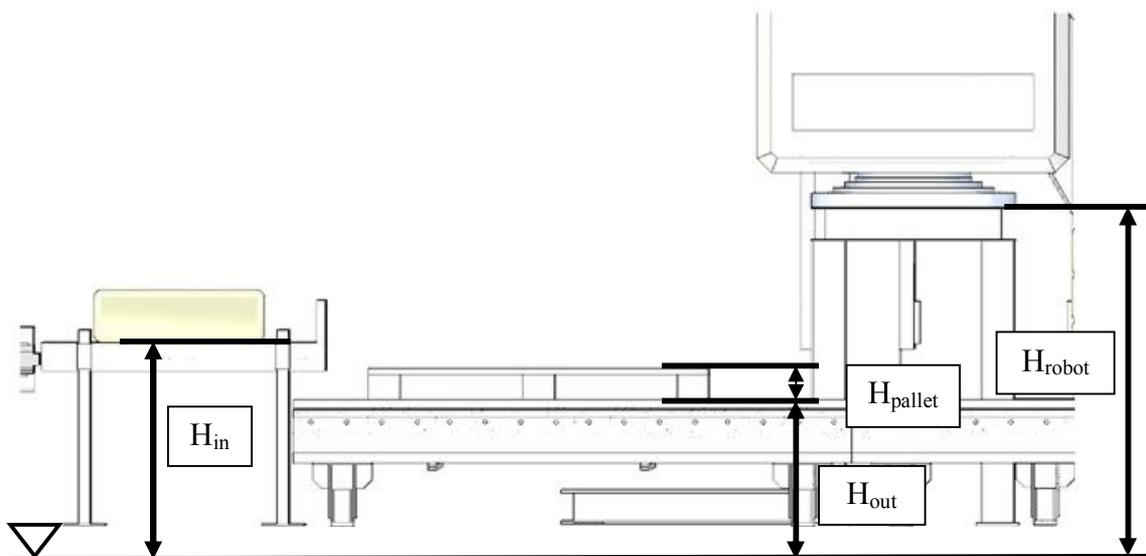




**Figura 3.2**



**Figura 3.3**



**Figura 3.4: altezze fondamentali per la progettazione dei cicli di lavoro del robot.**

Dalla figura 3.4 si possono vedere le quattro altezze fondamentali per programmare la movimentazione del robot. Prima di tutto si definisce un piano di riferimento (indicato con il triangolo) che tipicamente è il pavimento. Dopo di che si definiscono:

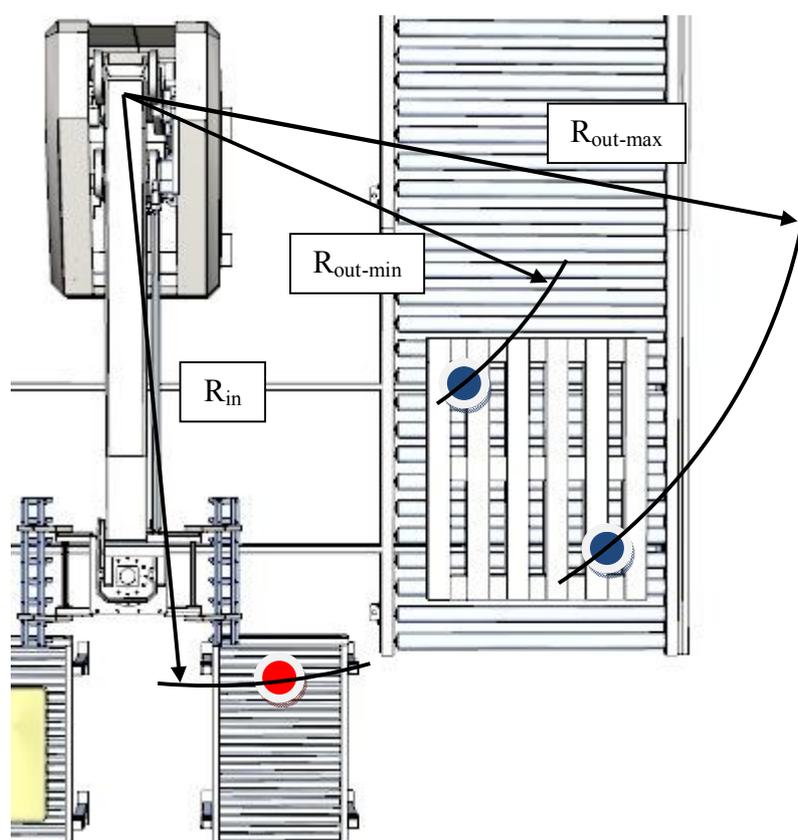
- $H_{in}$ : altezza della linea che trasporta il prodotto verso il robot. Nel caso di più ingressi, in generale, possono esserci più  $H_{in}$ . Valori fino adesso riscontrabili nei casi reali è tra 400 e 800 mm.
- $H_{out}$ : altezza della linea che trasporta il pallet ove vengono collocati i prodotti impilati. Nel caso di più uscite, in generale, possono esserci più  $H_{out}$ . Valore tipico nel caso reale è 500 mm.
- $H_{pallet}$ : altezza del pallet.
- $H_{robot}$ : altezza del basamento dove viene fissato il robot. Può avere un'altezza tra gli 800 e 1200 mm.

Il programmatore della movimentazione del robot, oltre alle 4 altezze fondamentali, deve conoscere anche:

- $R_{in}$ : raggio di ingresso del prodotto.
- $R_{out-min}$ : raggio minimo di uscita del prodotto.
- $R_{out-max}$ : raggio massimo di uscita del prodotto.

E' ovvio che le posizioni di ingresso del prodotto e le posizioni del prodotto nel pallet devono essere compresi dello spazio di lavoro del

robot. Il prodotto nella linea di ingresso si trova sempre nella stessa posizione e con lo stesso orientamento. Non si può dire certamente la stessa cosa quando viene collocato sopra il pallet. Questo fatto si può osservare dalla figura 3.5. Il bollino rosso è definito punto di ingresso del prodotto, i bollini blu sono definiti punti di pallettizzazione minimo e massimo.



**Figura 3.5: raggi fondamentali per la progettazione dei cicli di lavoro del robot.**

In generale, lo stesso bancale può portare vari prodotti impilati in differenti modi. Nella figura 3.6 vengono mostrate alcune delle configurazioni utilizzate nelle industrie. È facile intuire come l'organo terminale e l'intera struttura meccanica del robot debbano posizionarsi in modo differente per ogni prodotto nella fase di scarico sopra il pallet. La pallettizzazione si progetta definendo la disposizione dei prodotti in due strati differenti, strati che vengono ripetuti due a due. Ovviamente la

conformazione degli strati dipende dalle dimensioni del pallet e del prodotto.

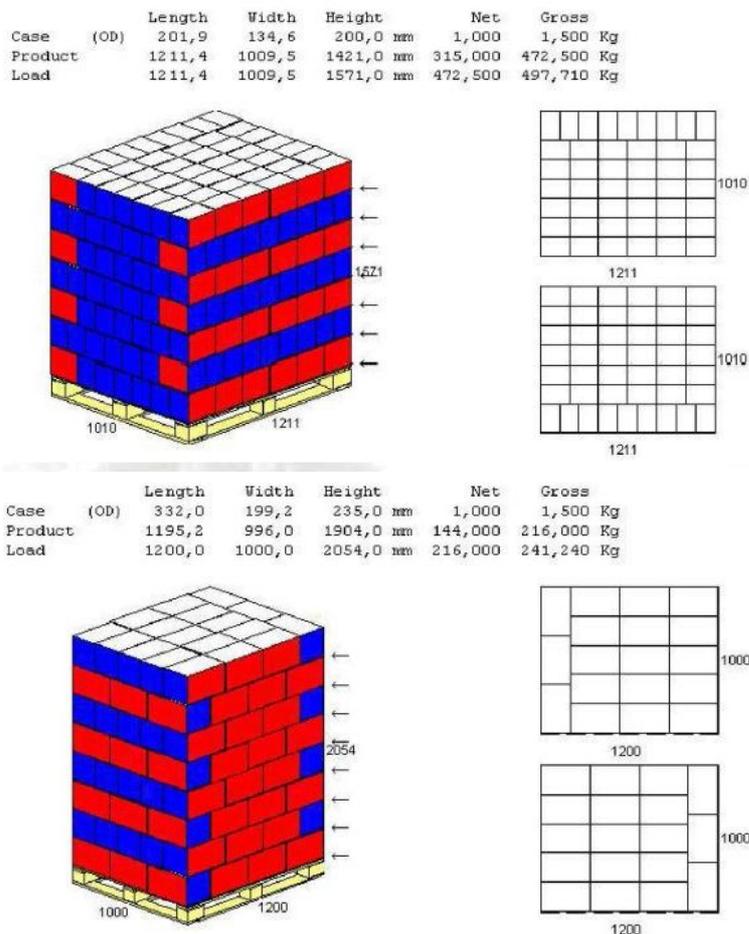


Figura 3.6: due esempi di pallettizzazione.

## 3.2 Il manipolatore “Antrop”

### 3.2.1 Introduzione

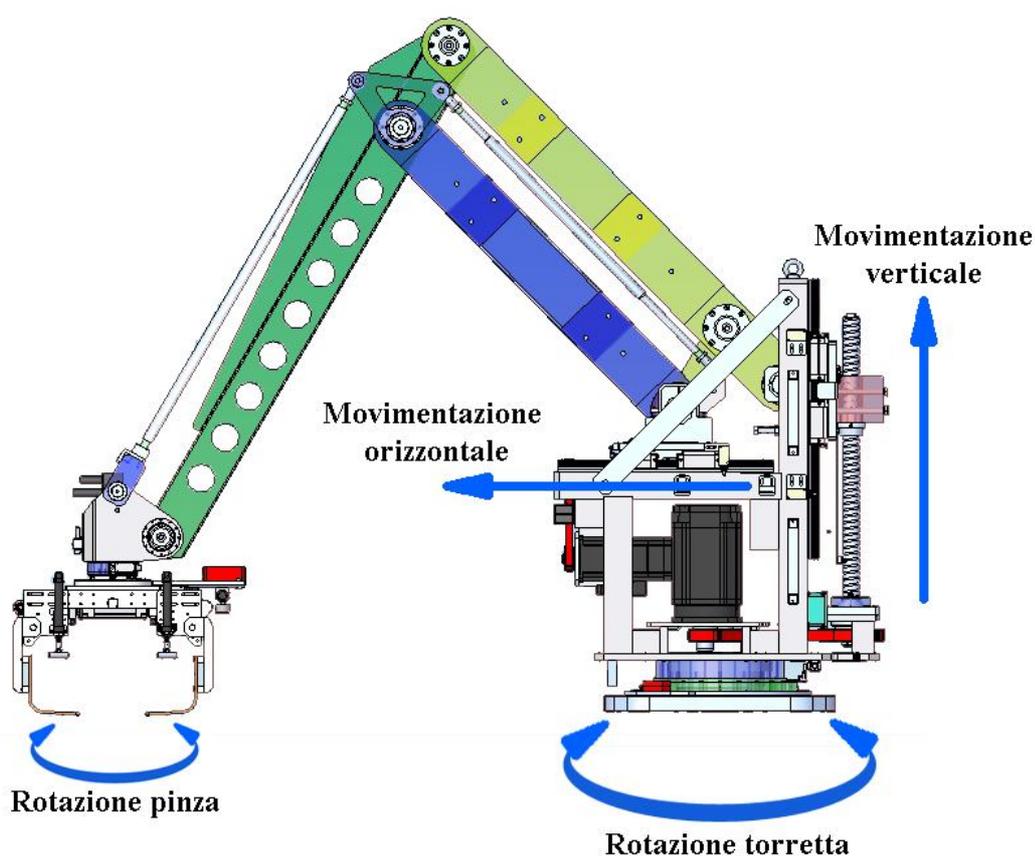
Il manipolatore “Antrop” nasce per svolgere il lavoro di pallettizzazione dei prodotti industriale. Fino ad oggi è stato inserito in un impianto con un massimo di quattro ingressi e quattro uscite, con la presenza di un magazzino falda e un magazzino pallet.

Il robot “Antrop” può essere fissato a terra o su un basamento rigido orizzontale. Non è stato progettato per essere installato da una base

diversa da quella orizzontale. E' formato da quattro gradi di mobilità, cioè quattro assi sono movimentati da motori brushless controllati elettronicamente. Le movimentazioni presenti nella struttura meccanica sono:

- Rotazione della torretta sull'asse verticale:
- Movimentazione verticale della pinza.
- Movimentazione orizzontale della pinza.
- Rotazione della pinza.

In realtà i gradi di mobilità sono maggiori se si contano anche gli attuatori, tipicamente pneumatici, presenti all'interno del gruppo pinza. Lo studio eseguito in questa tesi tiene conto solo della rotazione della torretta e delle movimentazioni verticali e orizzontali della pinza.



**Figura 3.7: movimentazioni fisse del robot “Antrop”.**

### 3.2.2 Dimostrazione delle relazioni cinematiche tra pinza e attuatori

La forma a pantografo del robot e la particolare lunghezza dei membri permettono di avere spostamenti verticali ed orizzontali della pinza indipendenti tra loro e linearmente proporzionali ai rispettivi moventi, proprietà estremamente importante in fase di progettazione e di studio. Il principio per cui avviene questo fenomeno è adesso descritto dalle seguente dimostrazione.

Si definiscono le seguenti lunghezze:

$$\overline{BC} = b_1 = 300 \text{ mm}$$

$$\overline{CP} = b_2 = 1500 \text{ mm}$$

$$\overline{AO_2} = l_1 = 250 \text{ mm}$$

$$\overline{AB} = l_2 = 1250 \text{ mm}$$

$$l = l_1 + l_2 = 300 + 1500 = 1800 \text{ mm}$$

$$b = b_1 + b_2 = 250 + 1250 = 1500 \text{ mm}$$

Prima di tutto, dalla figura sottostante si può notare come i punti P, O<sub>1</sub> e O<sub>2</sub> rimangano sempre collegabili da una retta immaginaria. Questa proprietà rimane costante qualunque posizione il robot assuma all'interno dello spazio di lavoro.

Dimostrazione della proporzionalità nella movimentazione verticale tra pinza e il movente y

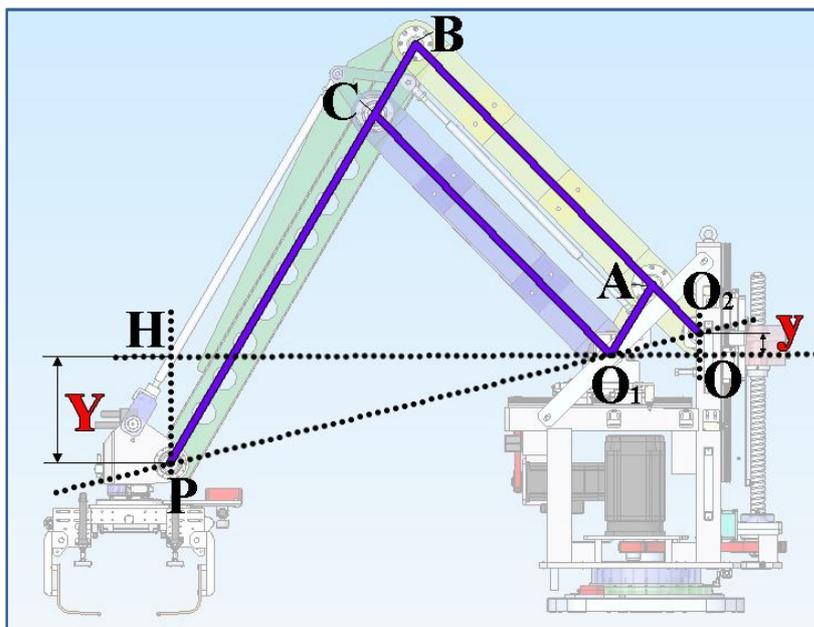


Figura 3.8: dimostrazione della proporzionalità nella movimentazione verticale.

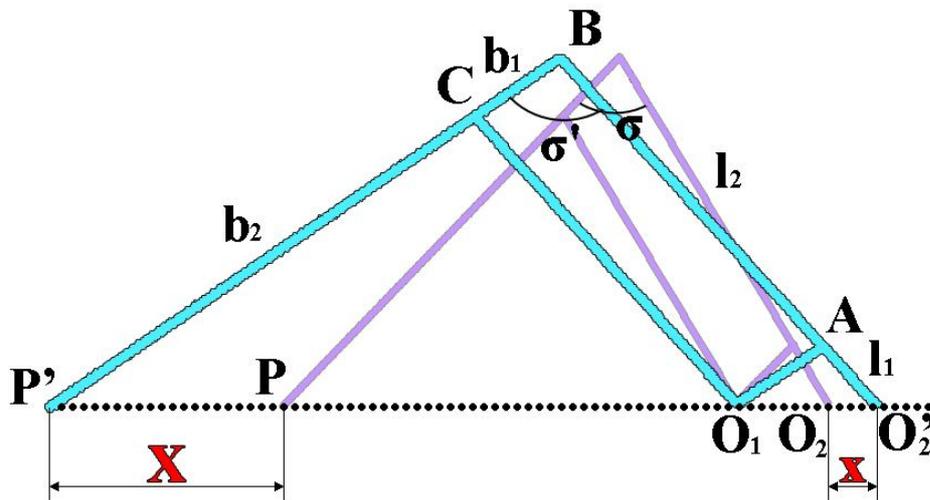
I triangoli  $\widehat{PHO_1}$  e  $\widehat{O_1OO_1}$  sono simili, quindi:

$$\frac{\overline{PO_1}}{\overline{O_1O_2}} = \frac{\overline{PH}}{\overline{OO_2}} = \frac{Y}{y} \quad (3.1)$$

Anche i triangoli  $\widehat{PCO_1}$  e  $\widehat{O_1O_2A}$  sono simili, quindi:

$$\frac{\overline{CP}}{\overline{AO_1}} = \frac{\overline{CO_1}}{\overline{AO_2}} = \frac{\overline{PO_1}}{\overline{O_1O_2}} = -5 \quad (3.2)$$

Dimostrazione della proporzionalità nella movimentazione orizzontale tra pinza e il movente x



**Figura 3.9: dimostrazione della proporzionalità nella movimentazione orizzontale.**

Utilizzando il teorema di Carnot e ricordando che  $l = l_1 + l_2$  e che  $b = b_1 + b_2$ :

$$\begin{aligned} \frac{X^2}{x^2} &= \frac{[l^2 + b^2 - 2 * l * b * \cos \sigma] - [l^2 + b^2 - 2 * l * b * \cos \sigma']}{[l_1^2 + b_1^2 - 2 * l_1 * b_1 * \cos \sigma] - [l_1^2 + b_1^2 - 2 * l_1 * b_1 * \cos \sigma']} \quad (3.3) \\ &= \frac{2 * l * b * (\cos \sigma - \cos \sigma')}{2 * l_1 * b_1 * (\cos \sigma - \cos \sigma')} = \frac{2 * l * b}{2 * l_1 * b_1} = 36 \end{aligned}$$

Quindi:

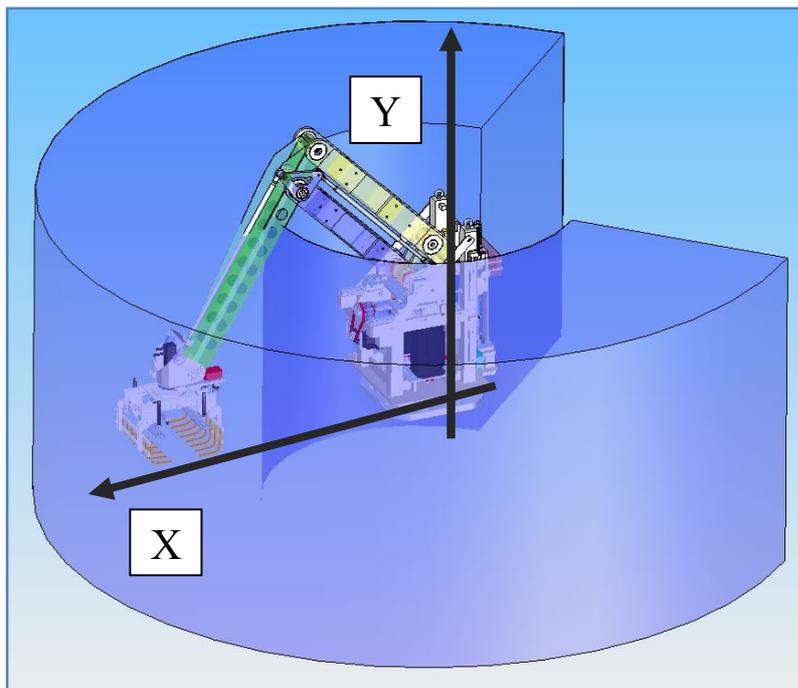
$$\frac{X}{x} = 6 \quad (3.4)$$

Riassumendo:

$$\begin{cases} Y = -5y \\ X = 6x \end{cases} \quad (3.5)$$

### 3.2.3 Spazio di lavoro

Nel figura 3.10 si può vedere lo spazio di lavoro definito sul centro della pinza. Da notare come il manipolatore “Antrop” si possa classificare all’interno della categoria dei robot a geometria cilindrica.



**Figura 3.10: spazio di lavoro del robot “Antrop”.**

Le misure caratteristiche dello spazio di lavoro sono riferite ad un sistema di riferimento collocato con l’asse verticale (Y) in corrispondenza dell’asse di rotazione della torretta e con l’asse orizzontale (X) in corrispondenza della linea di appoggio del basamento:

- Altezza minima: -798 mm

- Altezza massima: 1561 mm.
- Allungamento minimo: 1099 mm
- Allungamento massimo: 2695 mm.

### 3.2.4 Motorizzazioni e organi di trasmissione

Ad oggi esistono due tipi di motorizzazioni differenti, entrambi con alimentazione 400 VCA. La versione “standard” installa:

- Rotazione sull’asse verticale: MBA\_205 30 28
- Movimentazione verticale della pinza: MBA\_205 30 28
- Movimentazione orizzontale della pinza: SMBA\_142 30 15
- Rotazione della pinza: MB\_70 70 2.5

Tipo	Taglia	Stallo		Nominale		
		Coppia [Nm]	Corrente [A]	Coppia [Nm]	Velocità [min <sup>-1</sup> ]	Corrente [A]
MBA_205 30 28	205	28	20.1	25.7	3000	18
SMBA_142 30 15	142	15	9.7	12.5	3000	8.1
MB_70 70 2.5	70	2.5	3.56	1.2	7000	1.73

Picco coppia [Nm]	Inerzia		K <sub>e</sub> [Vs]	K <sub>t</sub> [Nm/A]
	Senza freno [Kgmm <sup>2</sup> ]	Con freno [Kgmm <sup>2</sup> ]		
123	5000	5535	0.9	1.5
47	1400	1600	0.89	1.54
9.8	81	110	0.42	0.73

**Tabella 3.1: dati tecnici dei motori brushless installati nella versione standard.**

I drive di alimentazione:

- Rotazione sull’asse verticale: TPDM15
- Movimentazione verticale della pinza: TPDM15
- Movimentazione orizzontale della pinza: TPDM05XX
- Rotazione della pinza: TPDMXX05

Questa versione presenta le seguenti caratteristiche:

- Carico al polso: 150 Kg (max)
- Precisione: +/- 0.5 mm

- Peso robot: 2050 Kg (più basamento di 450 Kg)
- Grado di protezione: IP 65
- Potenza installata: 20 KW

La versione potenziata, invece, installa:

- Rotazione sull'asse verticale: MBA\_205 30 28
- Movimentazione verticale della pinza: MBA\_205 30 28
- Movimentazione orizzontale della pinza: SMBA\_142 20 15
- Rotazione della pinza: SMB\_82 56 03

Tipo	Taglia	Stallo		Coppia [Nm]	Nominale Velocità [min <sup>-1</sup> ]	Corrente [A]
		Coppia [Nm]	Corrente [A]			
MBA_205 30 28	205	28	20.1	25.7	3000	18
SMBA_142 20 15	142	15	6.4	12.5	2000	5.5
SMB_82 56 03	82	3	1.8	2.7	3000	1.6

Picco coppia [Nm]	Inerzia		K <sub>e</sub> [Vs]	K <sub>t</sub> [Nm/A]
	Senza freno [Kgmm <sup>2</sup> ]	Con freno [Kgmm <sup>2</sup> ]		
123	5000	5535	0.9	1.5
47	1400	1600	1.36	2.35
9	140	183	0.96	1.66

**Tabella 3.2: dati tecnici dei motori brushless installati nella versione potenziata.**

I drive di alimentazione:

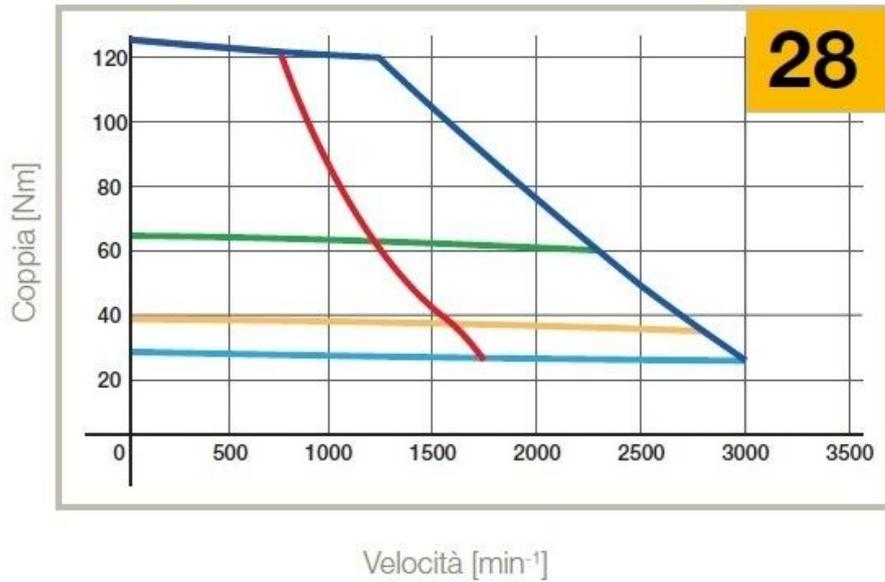
- Rotazione sull'asse verticale: TPDM30
- Movimentazione verticale della pinza: TPDM30
- Movimentazione orizzontale della pinza: TPDM10XX
- Rotazione della pinza: TPDMXX10

Questa versione presenta le seguenti caratteristiche:

- Carico al polso: 230 Kg (max)
- Precisione: +/- 0.5 mm
- Peso robot: 2050 Kg (più basamento di 450 Kg)
- Grado di protezione: IP 65
- Potenza installata: 40 KW

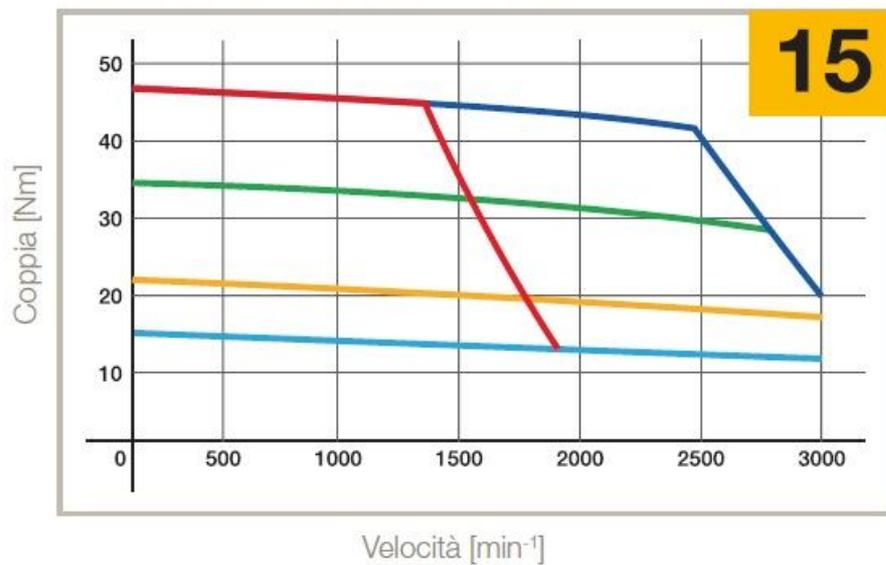
### MB/MH205

1700 min<sup>-1</sup> 230 V - 3000 min<sup>-1</sup> 400 V



### SMB/H142

1800 min<sup>-1</sup> 230 V - 3000 min<sup>-1</sup> 400 V



- S1 65 K, ΔT
- S3 10 %, 5 min, 400 V
- S3 50 %, 5 min
- S3 10 %, 5 min, 230 V
- S3 50 %, 5 min
- S3 20 %, 5 min

Figura 3.11: in alto, campo operativo del motore MBA\_205 30 28; in basso, campo operativo del motore SMBA\_142 30 15.

Gli organi di trasmissioni inseriti successivamente ai brushless sono:

- Rotazione sull'asse verticale:
  - Trasmissione a cinghia con numero di denti della ruota motrice pari a 40 e numero di denti della ruota condotta pari a 56.
  - Riduttore Cyclo F2CF-C55-90 con rapporto di riduzione pari a  $\frac{1}{90}$ .

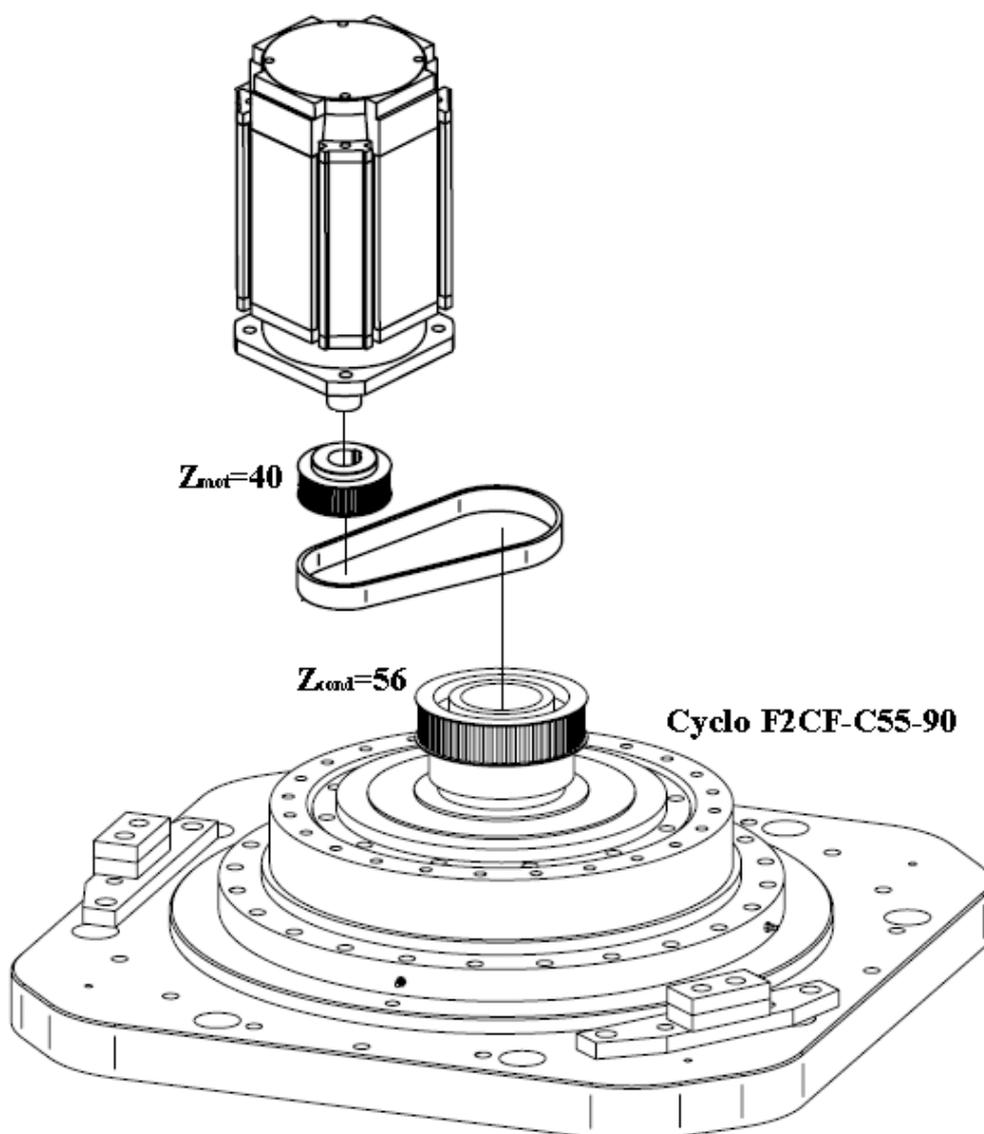


Figura 3.12: azionamento rotazione torretta.

- Movimentazione verticale della pinza:
  - Trasmissione a cinghia con numero di denti della ruota motrice pari a 36 e numero di denti della ruota condotta pari a 80
  - Vite a ricircolo di sfere con diametro 50 mm e passo 20 mm.

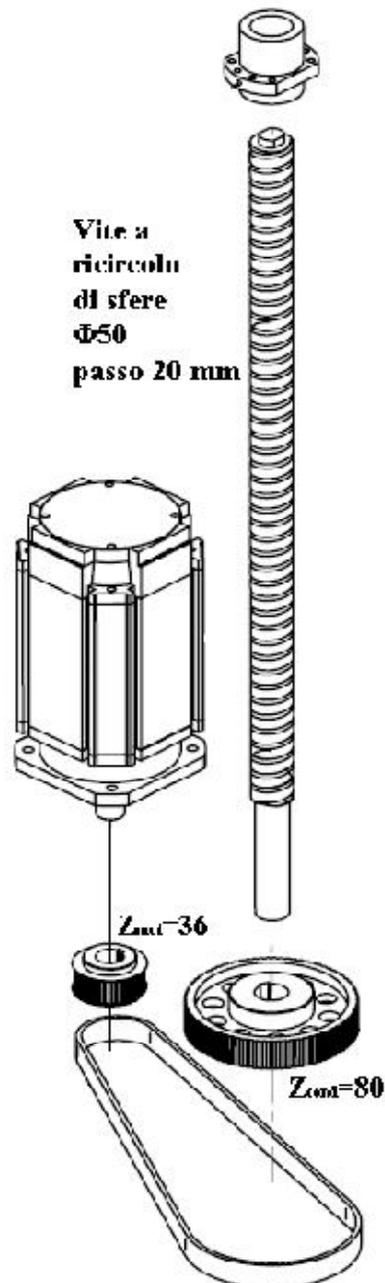


Figura 3.13: azionamento movimentazione verticale.

- Movimentazione orizzontale della pinza:
  - Trasmissione a cinghia con numero di denti della ruota motrice pari a 28 e numero di denti della ruota condotta pari a 56.
  - Vite a ricircolo di sfere con diametro 50 mm e passo 10 mm.

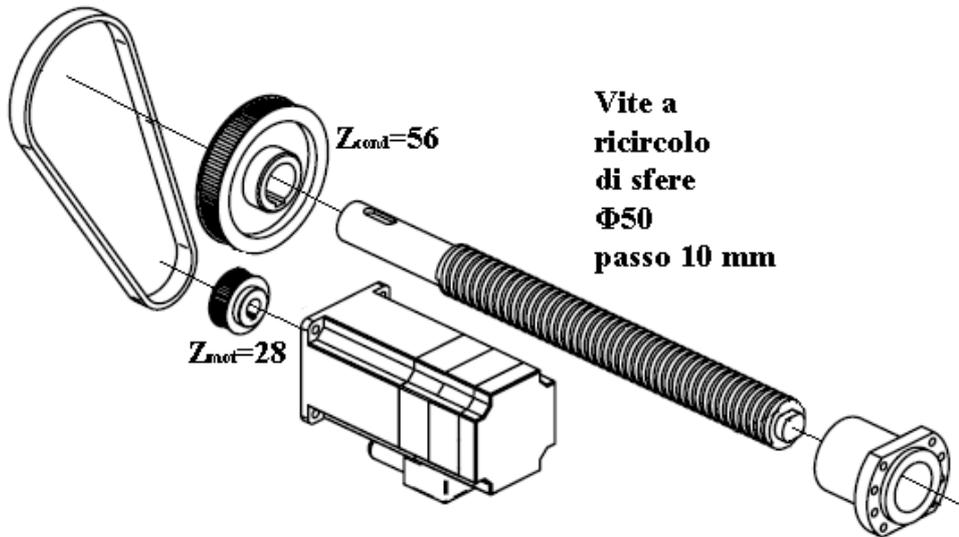


Figura 3.14: azionamento movimentazione orizzontale.

- Rotazione della pinza:
  - Riduttore Cyclo F2C-A25-120 con rapporto di riduzione  $\frac{1}{120}$ .

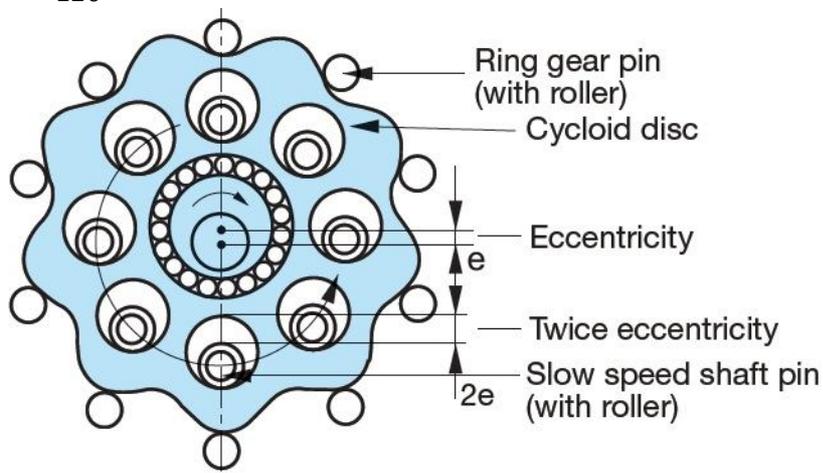


Figura 3.15: schema Cyclo.

### 3.2.5 Parte elettrica ed elettronica del robot

Come descritto nel capitolo di introduzione alla robotica, un robot mette insieme varie discipline come la meccanica, la elettronica, l'informatica e l'automatica. La parte elettrica ed elettronica del manipolatore "Antrop" è gestita dall'azienda Robox. L'implementazione elettrica della macchina è progettata con quadro di comando a bordo struttura, con evidenti vantaggi in termini di tempo per installazione presso il cliente finale. Il software dispone di un P.L.C. industriale per le molteplici configurazioni degli schermi di pallettizzazione richiesti dai committenti. In dotazione è previsto un terminale di programmazione HMI con color touch-screen, pulsanti di comando, cavo per l'utilizzo in posizione remota. In complesso, sono state osservate regole di ergonomia ed efficienza operativa dei tecnici preposti alla conduzione con spazi operativi esaurienti.



**Figura 3.16: a sinistra l'armadio elettrico IP54. Al centro la tastiera mobile di comando. A destra il pannello di programmazione touch screen.**

### 3.2.6 Legge di moto degli attuatori del robot

In fase di programmazione dei movimenti è stato scelto di utilizzare una legge di moto uguale per tutti gli attuatori, in particolare la legge di moto a sette tratti con accelerazione lineare. Questa permette di avere un buon controllo del movimento dell'attuatore sia in posizione, sia in velocità, che in coppia.

La scelta della legge di moto non è affatto da sottovalutare. Notevoli sono le ripercussioni sia sulla durata dei motori stessi e degli organi di trasmissione, sia sul rendimento e sulla precisione del robot. Un movimento dolce e non ruvido evita surriscaldamenti, attriti eccessivi, quindi usure indesiderate, oscillazioni (jerk) elevate. L'altra faccia della medaglia mostra un tempo di esecuzione più alto, cioè una diminuzione prestazionale del robot.

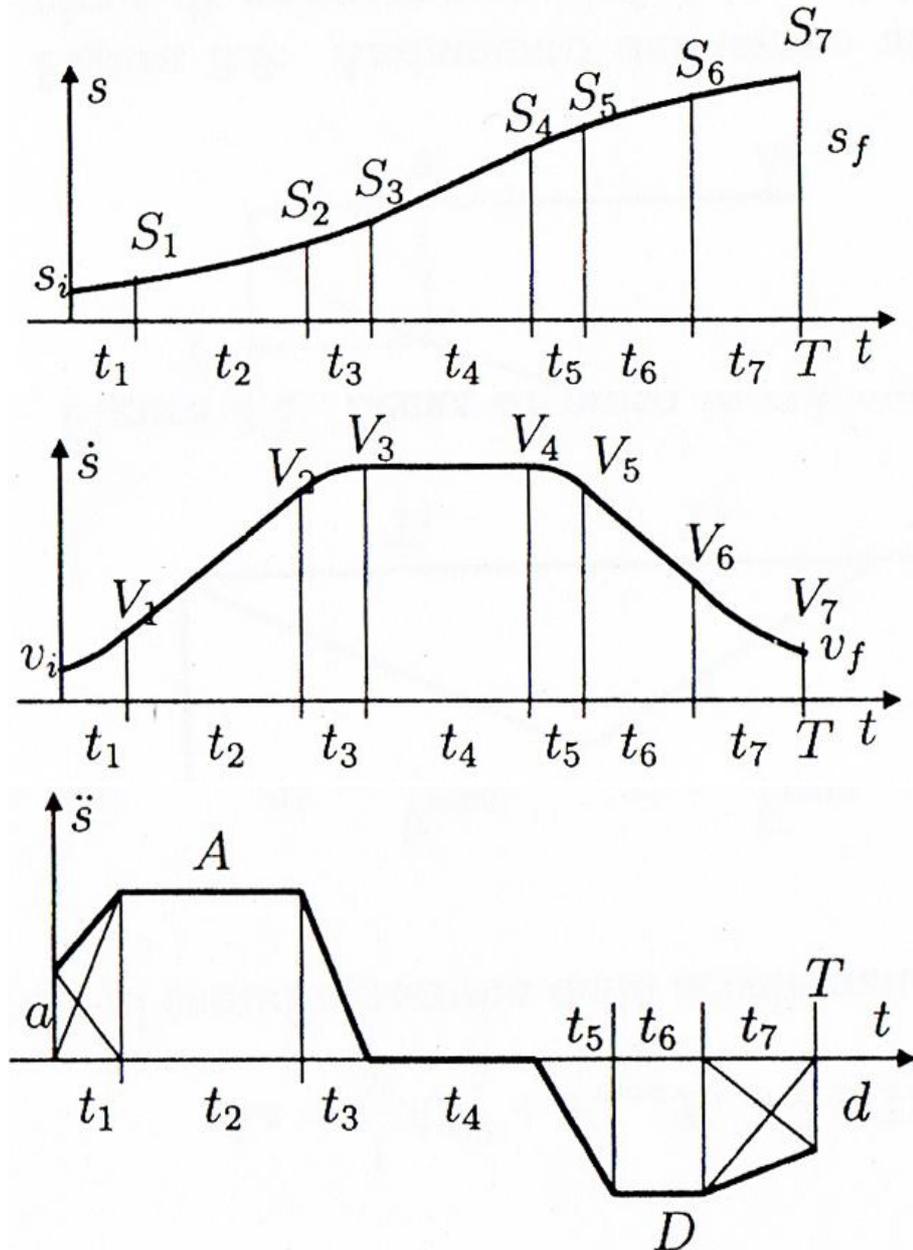


Figura 3.17: andamento qualitativo della posizione, della velocità e dell'accelerazione della legge di moto a sette tratti con accelerazione lineare.

Legge sette tratti con accelerazione lineare a tratti		
	valori istantanei	valori a fine tratto
	accelerazione, velocità e posizione iniziali $\ddot{s}(0) = a$ , $\dot{s}(0) = v_i$ , $s(0) = s_i$	
1	$0 \leq t \leq t_1$ $\ddot{s} = a \left( 1 - \frac{t}{t_1} \right) + A \frac{t}{t_1}$ $\dot{s} = v_i + a \left( t - \frac{t^2}{2t_1} \right) + A \frac{t^2}{2t_1}$ $s = s_i + v_i t + a \left( \frac{t^2}{2} - \frac{t^3}{6t_1} \right) + A \frac{t^3}{6t_1}$	$V_1 = v_i + a \frac{t_1}{2} + A \frac{t_1}{2}$ $S_1 = s_i + v_i t_1 + a \frac{t_1^2}{3} + A \frac{t_1^2}{6}$
2	$T_1 \leq t \leq T_2 \quad t' = t - t_1$ $\ddot{s} = A$ $\dot{s} = A t' + V_1$ $s = A \frac{t'^2}{2} + S_1 + V_1 t'$	$V_2 = V_1 + A t_2$ $S_2 = S_1 + A \frac{t_2^2}{2} + V_1 t_2$
3	$T_2 \leq t \leq T_3 \quad t' = t - T_2$ $\ddot{s} = A \left( 1 - \frac{t'}{t_3} \right)$ $\dot{s} = A \left( t' - \frac{t'^2}{2t_3} \right) + V_2$ $s = A \left( \frac{t'^2}{2} - \frac{t'^3}{6t_3} \right) + S_2 + V_2 t'$	$V_3 = V_2 + A \frac{t_3}{2}$ $S_3 = S_2 + A \frac{t_3^2}{3} + V_2 t_3$
4	$T_3 \leq t \leq T_4 \quad t' = t - T_3$ $\ddot{s} = 0$ $\dot{s} = V_3$ $s = S_3 + V_3 t'$	$V_4 = V_3$ $S_4 = S_3 + V_3 t_4$
5	$T_4 \leq t \leq T_5 \quad t' = t - T_4$ $\ddot{s} = D \frac{t'}{t_5}$ $\dot{s} = D \frac{t'^2}{2t_5} + V_4$ $s = D \frac{t'^3}{6t_5} + S_4 + V_4 t'$	$V_5 = V_4 + D \frac{t_5}{2}$ $S_5 = S_4 + D \frac{t_5^2}{6} + V_4 t_5$
6	$T_5 \leq t \leq T_6 \quad t' = t - T_5$ $\ddot{s} = D$ $\dot{s} = D t' + V_5$ $s = D \frac{t'^2}{2} + S_5 + V_5 t'$	$V_6 = V_5 + D t_6$ $S_6 = S_5 + D \frac{t_6^2}{2} + V_5 t_6$
7	$T_6 \leq t \leq T_7 \quad t' = t - T_6$ $\ddot{s} = D \left( 1 - \frac{t'}{t_7} \right) + d \frac{t'}{t_7}$ $\dot{s} = D \left( t' - \frac{t'^2}{2t_7} \right) + d \frac{t'^2}{2t_7} + V_6$ $s = D \left( \frac{t'^2}{2} - \frac{t'^3}{6t_7} \right) + d \frac{t'^3}{6t_7} + S_6 + V_6 t'$	$V_7 = V_6 + D \frac{t_7}{2} + d \frac{t_7}{2}$ $S_7 = S_6 + D \frac{t_7^2}{3} + d \frac{t_7^2}{6} + V_6 t_7$

**Tabella 3.3:** formule per il calcolo delle leggi di moto con accelerazione lineare a 7 tratti.

Quando il robot viene inserito all'interno di un impianto, la prima scelta da fare è quella del posizionamento rispetto al layout presente. La condizione principale da rispettare è che i punti di ingresso del prodotto e i punti di pallettizzazione siano all'interno dello spazio di lavoro. Dal punto di vista della gestione delle movimentazioni esiste un limite nella rotazione della torretta. Infatti questa deve essere inferiore ai  $360^\circ$ . L'angolo spazzato dal robot, che si può osservare nella figura 3.2 in blu, è definito ogni volta arbitrariamente dal programmatore della macchina. L'operatore deve stare attento a rispettare questa regola altrimenti il programma di controllo entra in crisi, in particolare nel momento della riaccensione della macchina. È ovvio che l'angolo che non verrà spazzato dal robot deve essere inserito in uno spazio non utile e non di intralcio allo svolgimento delle funzionalità del robot. Quanto appena detto deve essere esteso anche per al controllo della rotazione della pinza. La seconda scelta che il programmatore deve fare per installare il robot è quella di creare un sistema di riferimento cartesiano che permetta di dare le coordinate dei punti di ingresso e dei punti di pallettizzazione. Un asse sarà sicuramente in linea con l'asse di rotazione della torretta. Gli altri due saranno arbitrariamente decisi dal programmatore.

Dopo aver specificato le coordinate dei punti logistici, bisogna creare il ciclo di lavoro, cioè l'insieme di movimenti che il robot deve eseguire in sequenza per raggiungere i punti interessati. Questi movimenti posso chiamare in causa uno o più attuatori. Nel secondo caso la regola che li guida è la seguente: se si parte da un punto generico A e si vuole raggiungere un punto generico B, di cui sono note le coordinate, i motori devono muoversi contemporaneamente, cioè avviarsi in A e fermarsi in B. A priori sono noti i tempi che i singoli attuatori richiedono per svolgere il loro movimento se utilizzati alla massima potenza. Il tempo che il programma sceglie per far muovere contemporaneamente gli attuatori è quello maggiore. In questo modo tutti vengono regolati in base al motore "più lento".

## Capitolo 4

### ANALISI CINEMATICA DEL MANIPOLATORE

Il primo passo per studiare una macchina è l'analisi cinematica. Come accennato nell'introduzione, per effettuare i conti richiesti è stato sfruttato il software Matlab. Preme descrivere con precisione questo codice perché ne diverrà poi la base dell'analisi dinamica e dell'analisi delle sollecitazioni. Inoltre risulta essere la parte più a stretto contatto con l'aspetto elettronico del robot. Il programma realizzato è suddiviso in 4 parti. Nel file principale, inizialmente, sono presenti tutte le informazioni strutturali del robot, come le lunghezze dei membri e le relazioni tra gli angoli. Successivamente si richiede all'utente di inserire il tempo ciclo, il numero di campionamento e le posizioni di partenza ed arrivo dei moventi x, y e rotazione della torretta. Infine il programma calcola posizione, velocità, accelerazione e jerk dei giunti e di alcuni punti importanti del robot, come i baricentri dei membri. Come si può vedere della figura sottostante, alcune informazioni vengono condivise con i file adibiti a creare le leggi di moto. Quest'ultime vengono poi restituite al file principale.

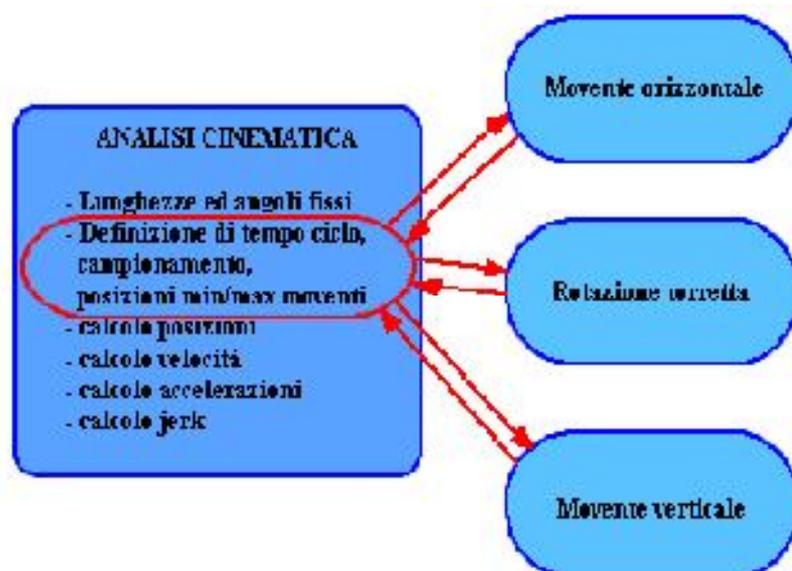
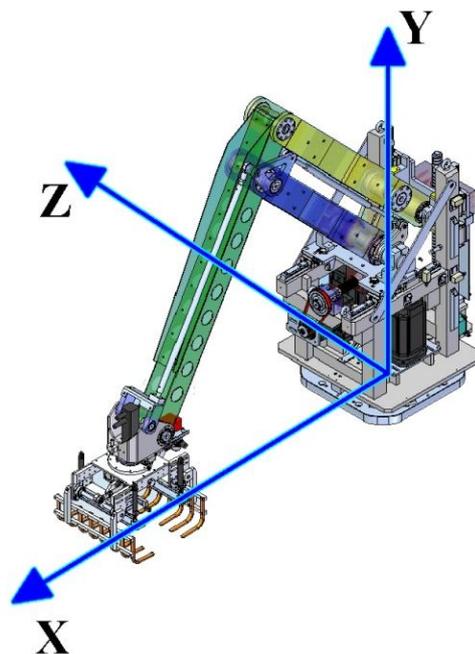


Figura 4.1: schema dei file di Matlab per il calcolo cinematico.

In precedenza si è parlato di tempo ciclo e di numero di campionamento. Con il primo si indica il tempo con cui i moventi eseguono lo spostamento dal punto iniziale al punto finale. Con il secondo si indica in quanti step si suddividono i vettori di movimentazione. Se il tempo ciclo non influisce assolutamente nel costo computazionale, il numero di campionamento, invece, ha un peso molto rilevante. All'aumentare di questo valore il costo computazionale aumenta sensibilmente.

Tra i vari metodi che esistono per studiare cinematicamente un meccanismo si è scelto di applicare le equazioni di chiusura. Le equazioni di chiusura descrivono l'annullarsi della somma vettoriale nel caso in cui si prendano in considerazione poligoni chiusi di vettori. Proiettando le componenti dei vettori su tre assi di un sistema di riferimento fisso, si ottengono tre equazioni scalari. Si è preferito utilizzare questo metodo perché è ritenuto maggiormente adatto alla morfologia del robot e facilmente implementabile nel software Matlab.

Per prima cosa si è scelto il sistema di riferimento identico a quello assunto nella definizione delle misure caratteristiche dello spazio di lavoro, cioè l'asse verticale Y in corrispondenza dell'asse di rotazione della torretta e l'asse orizzontale X in corrispondenza della linea di appoggio del basamento. L'asse Z è stato aggiunto in modo tale da ottenere una terna destrorsa.



**Figura 4.2: sistema di riferimento.**

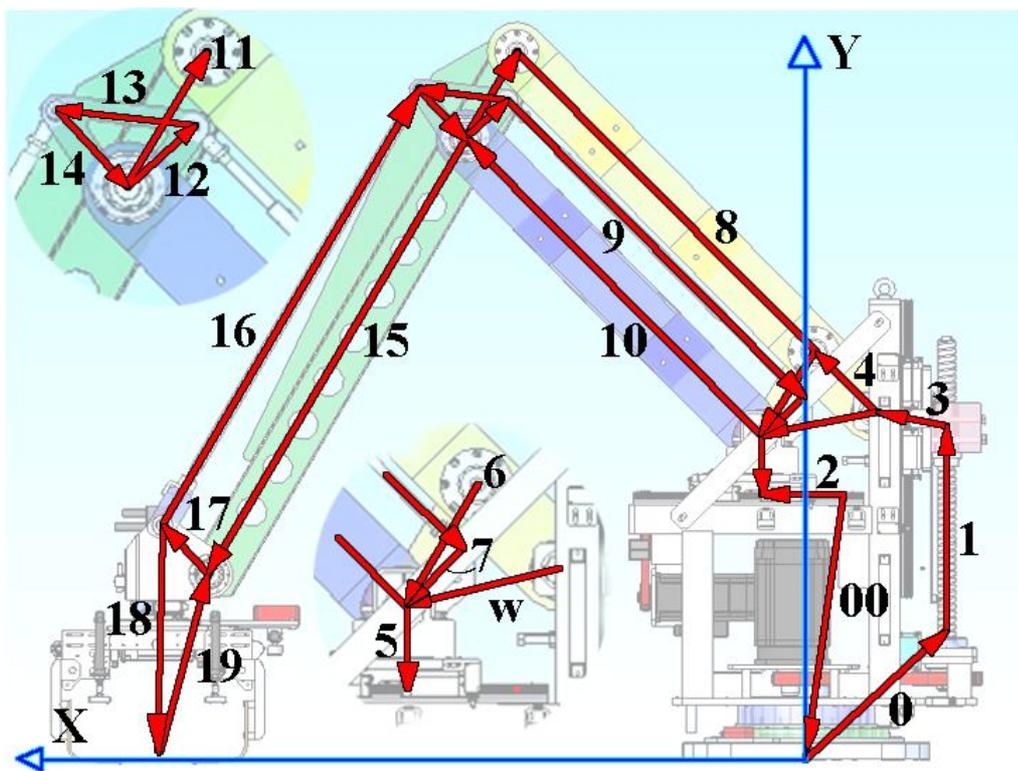


Figura 4.3: vettori utilizzati per analisi cinematica.

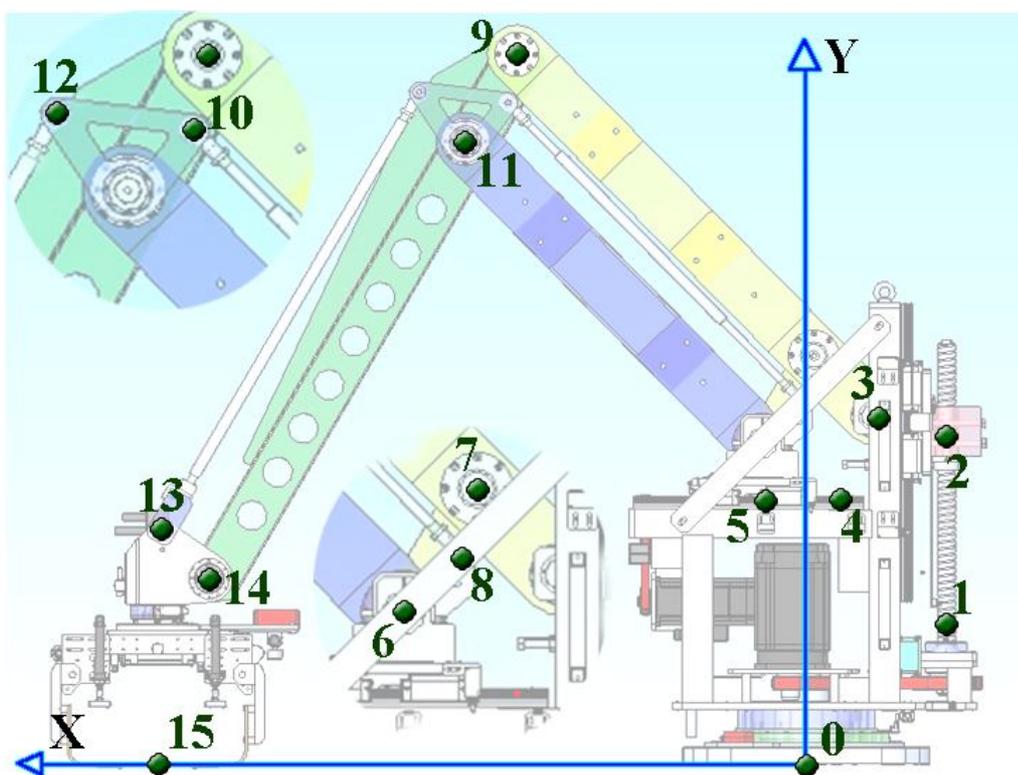


Figura 4.4: nodi utilizzati per analisi cinematica.

Come si può vedere in figura 4.3 e 4.4 tutti i membri o parti di membri sono rappresentati attraverso dei vettori rossi numerati in nero, mentre i nodi in corrispondenza dei giunti o di punti caratteristici sono rappresentati da punti e numeri verdi. I vettori sono definiti da due valori: il modulo del vettore e l'angolo descritto dall'orizzontale passante per il punto di applicazione. Per distinguere il numero dei vettori dal numero dei nodi, d'ora in poi verrà descritta la lunghezza dei vettori con  $Z_n$  e il corrispettivo angolo con  $\varphi_n$ , dove  $n$  è il numero del vettore.

Gli angoli sono riferiti all'orizzontale con rotazione oraria come in figura sottostante:

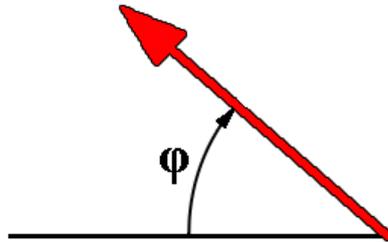


Figura 4.5: verso angolo positivo.

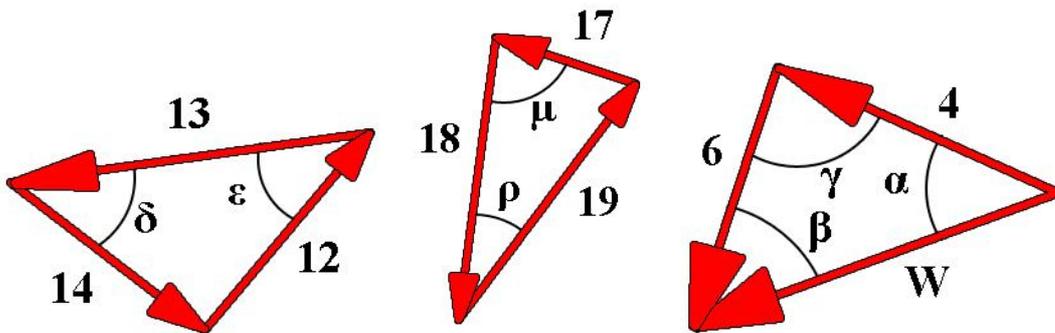


Figura 4.6: angoli non riferiti a vettori. Sono utili per definire le relazioni tra gli angoli.

$$\left\{ \begin{array}{l}
Z_0 = 828,76 \text{ mm} \\
Z_{00} = 722 \text{ mm} \\
Z_1 = [0: 472] \text{ mm} \\
Z_2 = [0: 266] \text{ mm} \\
Z_3 = 216 \text{ mm} \\
Z_4 = 250 \text{ mm} \\
Z_5 = 229 \text{ mm} \\
Z_6 = 300 \text{ mm} \\
Z_7 = 170 \text{ mm} \\
Z_8 = 1250 \text{ mm} \\
Z_9 = 1250 \text{ mm} \\
Z_{10} = 1250 \text{ mm} \\
Z_{11} = 300 \text{ mm} \\
Z_{12} = 170 \text{ mm} \\
Z_{13} = 262 \text{ mm} \\
Z_{14} = 200 \text{ mm} \\
Z_{15} = 1500 \text{ mm} \\
Z_{16} = 1500 \text{ mm} \\
Z_{17} = 200 \text{ mm} \\
Z_{18} = 693,78 \text{ mm} \\
Z_{19} = 568,70 \text{ mm} \\
Z_{20} = 1020 \text{ mm} \\
Z_{21} = 790 \text{ mm} \\
Z_{22} = 180 \text{ mm} \\
Z_{23} = 625 \text{ mm} \\
Z_{24} = 108 \text{ mm} \\
Z_{25} = 115 \text{ mm}
\end{array} \right.
\left\{ \begin{array}{l}
\varphi_0 = 119,8^\circ \\
\varphi_{00} = 270,4^\circ \\
\varphi_1 = 90^\circ \\
\varphi_2 = 0^\circ \\
\varphi_3 = 0^\circ \\
\varphi_4 = \alpha + \varphi_w \\
\varphi_5 = 270^\circ \\
\varphi_6 = 180 + \varphi_4 + \gamma \\
\varphi_7 = 316,5^\circ \\
\varphi_8 = \varphi_4 + 180^\circ \\
\varphi_9 = \varphi_8 \\
\varphi_{10} = \varphi_4 \\
\varphi_{11} = \varphi_6 - 180^\circ \\
\varphi_{12} = \varphi_7 - 180^\circ \\
\varphi_{13} = \varphi_{12} - 180^\circ + \varepsilon \\
\varphi_{14} = \varphi_{13} - 180^\circ + \delta \\
\varphi_{15} = \varphi_6 \\
\varphi_{16} = \varphi_{11} \\
\varphi_{17} = \varphi_{14} + 180^\circ \\
\varphi_{18} = \varphi_4 + 180^\circ + \mu \\
\varphi_{19} = \varphi_{18} + 180^\circ + \rho \\
\varphi_{20} = \varphi_{11} \\
\varphi_{21} = \varphi_8 \\
\varphi_{22} = \varphi_{11} \\
\varphi_{23} = \varphi_{10} \\
\varphi_{24} = \varphi_4 - 180^\circ \\
\varphi_{25} = \varphi_5
\end{array} \right.$$

Si nota come i vettori  $Z_0$  e  $Z_{00}$  formino il collegamento tra l'origine del sistema di riferimento e l'origine dei due moventi verticale e orizzontale, rispettivamente rappresentati dai vettori  $Z_1$  e  $Z_2$ . Con riferimento allo schema dei file di Matlab (Figura 4.1) con cui è strutturato il calcolo cinematico, è possibile notare come i file denominati "Movente verticale", "Movente orizzontale" e "Rotazione torretta" riportino al file principale le lunghezze dei vettori  $Z_1$  e  $Z_2$  e l'angolo di rotazione della torretta definita  $\delta_y$ . Come detto in precedenza, questi tre vettori vengono realizzati attraverso la legge di

moto con accelerazione lineare a sette tratti. Le tre funzioni che creano le leggi di moto assumono la stessa variabile di tempo ciclo. Questo rispecchia quello che succede nella realtà, come descritto nel capitolo 3, dove i moventi si muovono tutti contemporaneamente.

Nel caso in esame le equazioni di chiusura sono:

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{Z}_0 + \bar{Z}_{00} + \bar{Z}_1 + \bar{Z}_3 + \bar{W} + \bar{Z}_5 + \bar{Z}_2 = \bar{0} \\ \bar{W} + \bar{Z}_4 + \bar{Z}_6 = \bar{0} \\ \bar{Z}_6 + \bar{Z}_8 + \bar{Z}_{10} + \bar{Z}_{11} = \bar{0} \\ \bar{Z}_{12} + \bar{Z}_{13} + \bar{Z}_{14} = \bar{0} \\ \bar{Z}_{14} + \bar{Z}_{15} + \bar{Z}_{16} + \bar{Z}_{17} = \bar{0} \\ \bar{Z}_{17} + \bar{Z}_{18} + \bar{Z}_{19} = \bar{0} \end{array} \right. \quad (4.1)$$

Scrivendo le componenti nei tre assi cartesiani, le 6 equazioni vettoriali diventano 18 equazioni scalari:

$$\left\{ \begin{array}{l} (Z_0 * \cos \varphi_0 + Z_1 * \cos \varphi_1 + Z_3 * \cos \varphi_3 + w * \cos \varphi_w + \\ + Z_5 * \cos \varphi_5 - Z_2 * \cos \varphi_2 + Z_{00} * \cos \varphi_{00}) * \cos \delta_y = 0 \\ Z_0 * \sin \varphi_0 + Z_1 * \sin \varphi_1 + Z_3 * \sin \varphi_3 + w * \sin \varphi_w + \\ + Z_5 * \sin \varphi_5 - Z_2 * \sin \varphi_2 + Z_{00} * \sin \varphi_{00} = 0 \\ (Z_0 * \cos \varphi_0 + Z_1 * \cos \varphi_1 + Z_3 * \cos \varphi_3 + w * \cos \varphi_w + \\ + Z_5 * \cos \varphi_5 - Z_2 * \cos \varphi_2 + Z_{00} * \cos \varphi_{00}) * \sin \delta_y = 0 \end{array} \right. \quad (4.2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} (w * \cos \varphi_w - Z_6 * \cos \varphi_6 - Z_4 * \cos \varphi_4) * \cos \delta_y = 0 \\ w * \sin \varphi_w + Z_6 * \sin \varphi_6 - Z_4 * \sin \varphi_4 = 0 \\ (w * \cos \varphi_w - Z_6 * \cos \varphi_6 - Z_4 * \cos \varphi_4) * \sin \delta_y = 0 \end{array} \right. \quad (4.3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} (Z_6 * \cos \varphi_6 + Z_8 * \cos \varphi_8 + Z_{10} * \cos \varphi_{10} + \\ \quad + Z_{11} * \cos \varphi_{11}) * \cos \delta_y = 0 \\ w * \sin \varphi_w + Z_6 * \sin \varphi_6 - Z_4 * \sin \varphi_4 = 0 \\ (Z_6 * \cos \varphi_6 + Z_8 * \cos \varphi_8 + Z_{10} * \cos \varphi_{10} + \\ \quad + Z_{11} * \cos \varphi_{11}) * \sin \delta_y = 0 \end{array} \right. \quad (4.4)$$

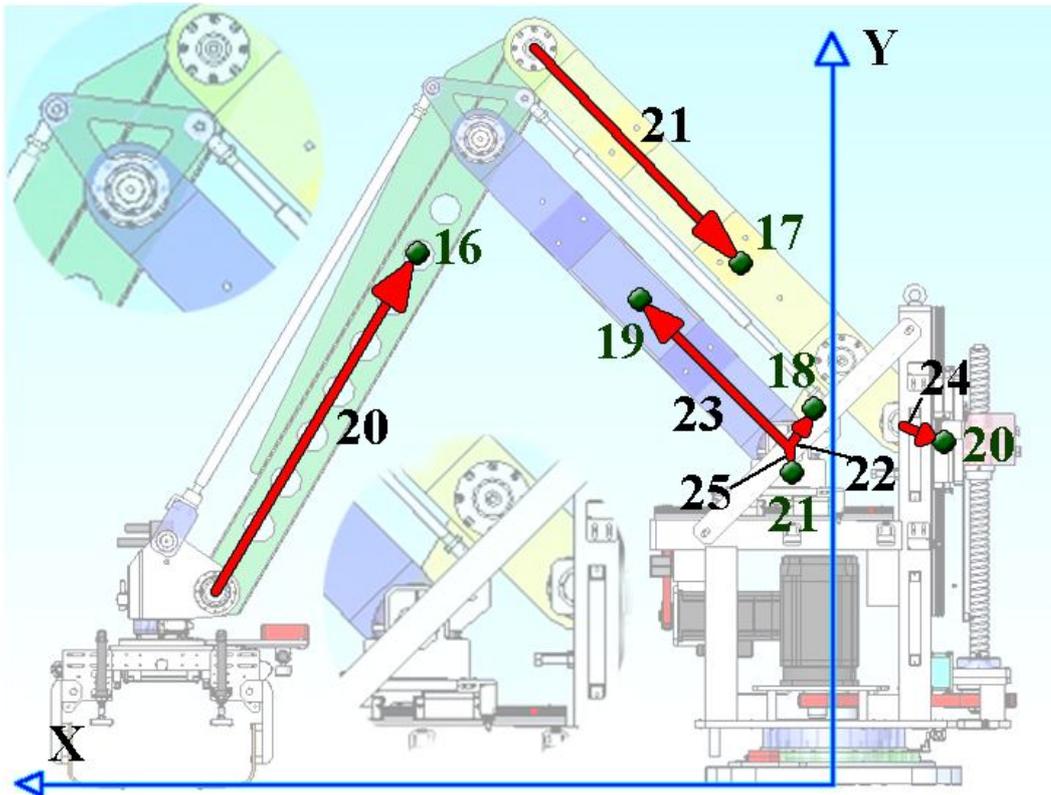
$$\left\{ \begin{array}{l} (Z_{12} * \cos \varphi_{12} + Z_{13} * \cos \varphi_{13} + Z_{14} * \cos \varphi_{14}) * \cos \delta_y = 0 \\ Z_{12} * \cos \varphi_{12} + Z_{13} * \sin \varphi_{13} + Z_{14} * \sin \varphi_{14} = 0 \\ (Z_{12} * \cos \varphi_{12} + Z_{13} * \cos \varphi_{13} + Z_{14} * \cos \varphi_{14}) * \sin \delta_y = 0 \end{array} \right. \quad (4.5)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} (Z_{14} * \cos \varphi_{14} + Z_{15} * \cos \varphi_{15} + Z_{16} * \cos \varphi_{16} \\ \quad + Z_{17} * \cos \varphi_{17}) * \cos \delta_y = 0 \\ Z_{14} * \cos \varphi_{14} + Z_{15} * \sin \varphi_{15} + Z_{16} * \sin \varphi_{16} \\ \quad + Z_{17} * \sin \varphi_{17} = 0 \\ (Z_{14} * \cos \varphi_{14} + Z_{15} * \cos \varphi_{15} + Z_{16} * \cos \varphi_{16} \\ \quad + Z_{17} * \cos \varphi_{17}) * \sin \delta_y = 0 \end{array} \right. \quad (4.6)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} (Z_{17} * \cos \varphi_{17} + Z_{18} * \cos \varphi_{18} + Z_{19} * \cos \varphi_{19}) * \cos \delta_y = 0 \\ Z_{17} * \cos \varphi_{17} + Z_{18} * \sin \varphi_{18} + Z_{19} * \sin \varphi_{19} = 0 \\ (Z_{17} * \cos \varphi_{17} + Z_{18} * \cos \varphi_{18} + Z_{19} * \cos \varphi_{19}) * \sin \delta_y = 0 \end{array} \right. \quad (4.7)$$

Il vettore  $w$  non si riferisce ad alcun membro, ma è utile per facilitare i calcoli tramite Matlab. Con queste 18 equazioni è possibile avere tutte le informazioni necessarie per sapere la posizione di tutti i giunti e di tutti i membri del robot.

Oltre ai punti caratteristici del robot descritti dai punti 0 fino al 15, sono stati inseriti anche altri 6 punti e 6 vettori in corrispondenza dei baricentri dei membri “pesanti”. Questi membri sono definiti in tal modo perché sono quelli che hanno massa rilevante e che saranno presi in considerazione del calcolo dell’analisi dinamica e dell’analisi delle sollecitazioni.



**Figura 4.7: nodi e vettori utilizzati per descrivere i baricentri.**

Note le posizioni dei giunti, è facile calcolare le derivate numeriche, in modo tale da trovare velocità, accelerazione e jerk di essi. Questo viene fatto per ogni componente x, y e z. Viene definito il tempo del singolo campionamento:

$$\Delta t = \frac{\textit{tempo ciclo}}{\textit{campionamento}} \quad (4.8)$$

Per calcolare la velocità media, l'accelerazione media e il jerk medio (il pedice m indica medio) tra due punti si utilizzano le seguenti formule:

$$\vec{v}_m = \frac{\overrightarrow{pos}_{fin} - \overrightarrow{pos}_{in}}{\Delta t} = \frac{\Delta \overrightarrow{pos}}{\Delta t} \quad (4.9)$$

$$\vec{a}_m = \frac{\vec{v}_{fin} - \vec{v}_{in}}{\Delta t} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} \quad (4.10)$$

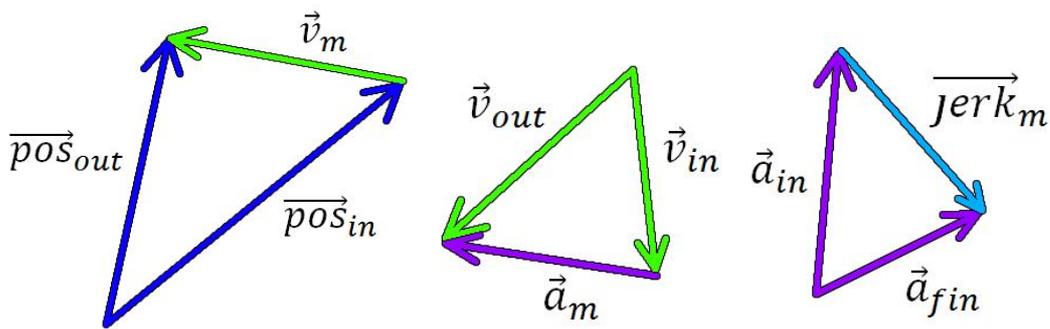
$$\overrightarrow{jerk}_m = \frac{\vec{a}_{fin} - \vec{a}_{in}}{\Delta t} = \frac{\Delta \vec{a}}{\Delta t} \quad (4.11)$$

Velocità, accelerazione e jerk sono descritte dalle loro componenti negli assi X, Y e Z:

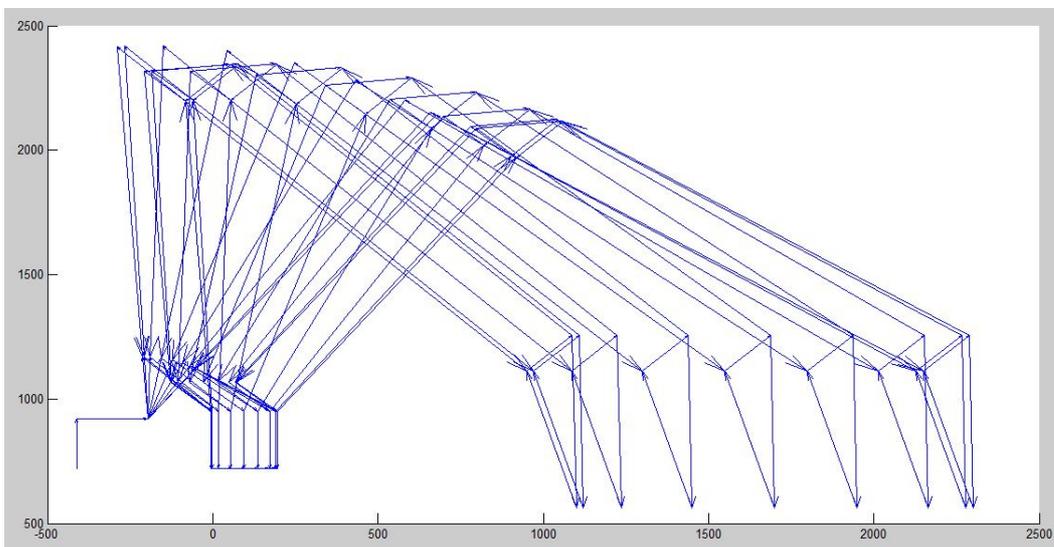
$$\left\{ \begin{array}{l} \overrightarrow{v}_{m_x} = \frac{\overrightarrow{pos}_{fin_x} - \overrightarrow{pos}_{in_x}}{\Delta t} = \frac{\Delta \overrightarrow{pos}_x}{\Delta t} \\ \overrightarrow{a}_{m_x} = \frac{\vec{v}_{fin_x} - \vec{v}_{in_x}}{\Delta t} = \frac{\Delta \vec{v}_x}{\Delta t} \\ \overrightarrow{jerk}_{m_x} = \frac{\vec{a}_{fin_x} - \vec{a}_{in_x}}{\Delta t} = \frac{\Delta \vec{a}_x}{\Delta t} \end{array} \right. \quad (4.12)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \overrightarrow{v}_{m_y} = \frac{\overrightarrow{pos}_{fin_y} - \overrightarrow{pos}_{in_y}}{\Delta t} = \frac{\Delta \overrightarrow{pos}_y}{\Delta t} \\ \overrightarrow{a}_{m_y} = \frac{\vec{v}_{fin_y} - \vec{v}_{in_y}}{\Delta t} = \frac{\Delta \vec{v}_y}{\Delta t} \\ \overrightarrow{jerk}_{m_y} = \frac{\vec{a}_{fin_y} - \vec{a}_{in_y}}{\Delta t} = \frac{\Delta \vec{a}_y}{\Delta t} \end{array} \right. \quad (4.13)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \overrightarrow{v}_{m_z} = \frac{\overrightarrow{pos}_{fin_z} - \overrightarrow{pos}_{in_z}}{\Delta t} = \frac{\Delta \overrightarrow{pos}_z}{\Delta t} \\ \overrightarrow{a}_{m_z} = \frac{\vec{v}_{fin_z} - \vec{v}_{in_z}}{\Delta t} = \frac{\Delta \vec{v}_z}{\Delta t} \\ \overrightarrow{jerk}_{m_z} = \frac{\vec{a}_{fin_z} - \vec{a}_{in_z}}{\Delta t} = \frac{\Delta \vec{a}_z}{\Delta t} \end{array} \right. \quad (4.14)$$



**Figura 4.8: rappresentazione vettoriale della velocità, accelerazione e jerk medio.**



**Figura 4.9: esempio del plot che realizza il programma Matlab del calcolo cinematico.**

Come risultato finale il programma di calcolo dell'analisi cinematica effettua una simulazione dimostrativa della movimentazione del robot. Nel caso sopra raffigurato si può vedere una movimentazione orizzontale della pinza. Preme osservare che nel programma in Matlab sono state utilizzate inizialmente lunghezze in millimetri, unità di misura non conveniente nei conti successivi di dinamica. Lo script dell'analisi cinematica è riportato in appendice A.

# Capitolo 5

## ANALISI DINAMICA DEL MANIPOLATORE

Il secondo passo per studiare una macchina è l'analisi dinamica. Viene affrontato il problema di dinamica relativo al piano (X,Y) in modo separato da quello relativo alla rotazione della torretta. Questo è possibile data la geometria cilindrica del robot. In entrambi i casi si è di fronte ad un problema di dinamica inversa.

### 5.1 Dinamica relativa al piano (X,Y)

#### 5.1.1 Analisi cinetostatica

L'analisi dinamica si basa sulla totalità dei calcoli eseguiti nell'analisi cinematica. In particolare le accelerazioni dei giunti e gli angoli dei membri.

Per effettuare l'analisi dinamica inversa è stata utilizzata l'analisi cinetostatica. Essa consente di determinare le azioni motrici e quelle che i membri si trasmettono mutuamente per effetto delle azioni applicate dall'esterno, comprese quelle che derivano dal movimento del meccanismo. I metodi dell'analisi cinetostatica possono essere indicati come metodo della sovrapposizione, metodo globale e metodo dell'apertura della catena cinematica. Si è preferito utilizzare quest'ultimo per analizzare dinamicamente il manipolatore. Il metodo dell'apertura della catena cinematica si fonda sull'osservazione che per meccanismi in catena aperta e in catena chiusa le equazioni esprimenti le condizioni di equilibrio si possono scrivere e risolvere membro per membro. Il procedimento utilizzato è il seguente:

- 1) Definire un verso positivo delle forze e dei momenti.
- 2) Trasformare il meccanismo da labile a isostatico.

3) Aprire la catena cinematica e scrivere le equazioni di equilibrio alla traslazione orizzontale, verticale e alla rotazione inserendo forze esterne, reazioni interne e reazioni vincolari.

4) Risolvere le equazioni e ricavare le incognite.

Nel caso in esame, è stato schematizzato il manipolatore con la seguente catena cinematica:

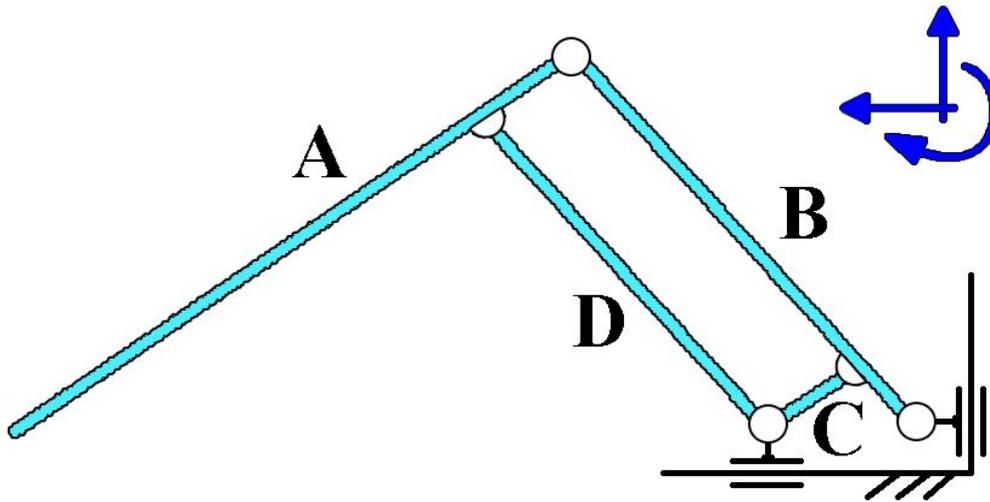


Figura 5.1: struttura labile del manipolatore.

Le viti a ricircolo di sfere si possono schematizzare come due giunti prismatici. Per rendere isostatico il meccanismo bisogna quindi bloccare gli spostamenti di questi.

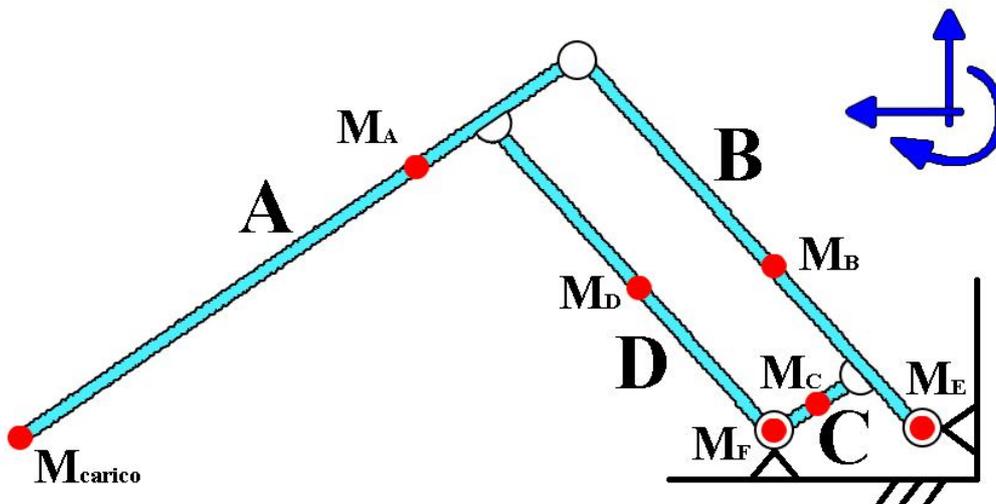


Figura 5.2: struttura isostatica del manipolatore.

Tenendo conto che  $\vec{g} = -9.81 \text{ m/s}^2$ , vengono definite:

*Componenti in x  
delle forze di inerzia*

$$\begin{aligned}
 \overrightarrow{F_{l-16-x}} &= M_A * \overrightarrow{acc_{16-x}} \\
 \overrightarrow{F_{l-17-x}} &= M_B * \overrightarrow{acc_{17-x}} \\
 \overrightarrow{F_{l-18-x}} &= M_C * \overrightarrow{acc_{18-x}} \\
 \overrightarrow{F_{l-19-x}} &= M_D * \overrightarrow{acc_{19-x}} \\
 \overrightarrow{F_{l-21-x}} &= M_F * \overrightarrow{acc_{21-x}} \\
 \overrightarrow{F_{l-carico-x}} &= M_{carico} * \overrightarrow{acc_{carico-x}}
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

*Componenti in y  
delle forze di inerzia*

$$\begin{aligned}
 \overrightarrow{F_{l-16-y}} &= M_A * \overrightarrow{acc_{16-y}} \\
 \overrightarrow{F_{l-17-y}} &= M_B * \overrightarrow{acc_{17-y}} \\
 \overrightarrow{F_{l-18-y}} &= M_C * \overrightarrow{acc_{18-y}} \\
 \overrightarrow{F_{l-19-y}} &= M_D * \overrightarrow{acc_{19-y}} \\
 \overrightarrow{F_{l-20-y}} &= M_E * \overrightarrow{acc_{20-y}} \\
 \overrightarrow{F_{l-carico-y}} &= M_{carico} * \overrightarrow{acc_{carico-y}}
 \end{aligned} \tag{5.2}$$

*Forze peso*

$$\begin{aligned}
 \overrightarrow{F_{p-16}} &= M_A * \vec{g} \\
 \overrightarrow{F_{p-17}} &= M_B * \vec{g} \\
 \overrightarrow{F_{p-18}} &= M_C * \vec{g} \\
 \overrightarrow{F_{p-19}} &= M_D * \vec{g} \\
 \overrightarrow{F_{p-20}} &= M_E * \vec{g} \\
 \overrightarrow{F_{p-21}} &= M_F * \vec{g} \\
 \overrightarrow{F_{p-carico}} &= M_{carico} * \vec{g}
 \end{aligned} \tag{5.3}$$

*Forze centrifughe*

$$\begin{aligned}
 \overrightarrow{F_{c-carico}} &= M_{carico} * \omega_{torretta}^2 * \overrightarrow{r_{carico}} \\
 \overrightarrow{F_{c-16}} &= M_A * \omega_{torretta}^2 * \overrightarrow{r_A} \\
 \overrightarrow{F_{c-17}} &= M_B * \omega_{torretta}^2 * \overrightarrow{r_B} \\
 \overrightarrow{F_{c-18}} &= M_C * \omega_{torretta}^2 * \overrightarrow{r_C} \\
 \overrightarrow{F_{c-19}} &= M_D * \omega_{torretta}^2 * \overrightarrow{r_D}
 \end{aligned} \tag{5.4}$$

Dove:

$\overrightarrow{acc_{16-x}}$  = componente x dell'accelerazione del punto 16 in  $m/s^2$

$\overrightarrow{acc_{17-x}}$  = componente x dell'accelerazione del punto 17 in  $m/s^2$

$\overrightarrow{acc_{18-x}}$  = componente x dell'accelerazione del punto 18 in  $m/s^2$

$\overrightarrow{acc_{19-x}}$  = componente x dell'accelerazione del punto 19 in  $m/s^2$

$\overrightarrow{acc_{21-x}}$  = componente x dell'accelerazione del punto 21 in  $m/s^2$

$\overrightarrow{acc_{16-y}}$  = componente y dell'accelerazione del punto 16 in  $m/s^2$

$\overrightarrow{acc_{17-y}}$  = componente y dell'accelerazione del punto 17 in  $m/s^2$

$\overrightarrow{acc_{18-y}}$  = componente y dell'accelerazione del punto 18 in  $m/s^2$

$\overrightarrow{acc_{19-y}}$  = componente y dell'accelerazione del punto 19 in  $m/s^2$

$\overrightarrow{acc_{20-y}}$  = componente y dell'accelerazione del punto 20 in  $m/s^2$

$M_A$  = massa del membro A = 60 Kg

$M_B$  = massa del membro B = 120 Kg

$M_C$  = massa del membro C = 30 Kg

$M_D$  = massa del membro D = 100 Kg

$M_E$  = massa dei membri traslati dal movente Y = 40 Kg

$M_F$  = massa dei membri traslati dal movente X = 40 Kg

$M_{carico}$  = massa del carico sommato a quello della pinza in Kg

$J_A$  = momento d'inerzia baricentrico del membro A in  $Kg * m^2$

$J_B$  = momento d'inerzia baricentrico del membro B in  $Kg * m^2$

$J_C$  = momento d'inerzia baricentrico del membro C in  $Kg * m^2$

$J_D$  = momento d'inerzia baricentrico del membro D in  $Kg * m^2$

$r_A$  = raggio del baricentro del membro A in metri

$r_B$  = raggio del baricentro del membro B in metri

$r_C$  = raggio del baricentro del membro C in metri

$r_D$  = raggio del baricentro del membro D in metri

$r_{carico}$  = raggio del carico in metri

$\ddot{\omega}_A$  = accelerazione angolare del membro A in  $rad/s^2$

$\dot{\omega}_A$  = accelerazione angolare del membro A in  $rad/s^2$

$\dot{\omega}_A$  = accelerazione angolare del membro A in  $rad/s^2$

$\dot{\omega}_A$  = accelerazione angolare del membro A in  $rad/s^2$

$\omega_{torretta}$  = velocità angolare della torretta in  $rad/s$

Le equazioni di equilibrio che di seguito vengono riportate per ogni membro sono così disposte: la prima rappresenta l'equilibrio alla traslazione orizzontale, la seconda rappresenta l'equilibrio alla traslazione verticale, la terza rappresenta l'equilibrio alla rotazione rispetto ad un punto che viene specificato per ogni membro. Le equazioni di equilibrio al nodo sono state scritte solo per le due traslazioni e non per la rotazione.

### Equilibrio del membro A.

L'equilibrio alla rotazione è effettuato attorno al punto 9.

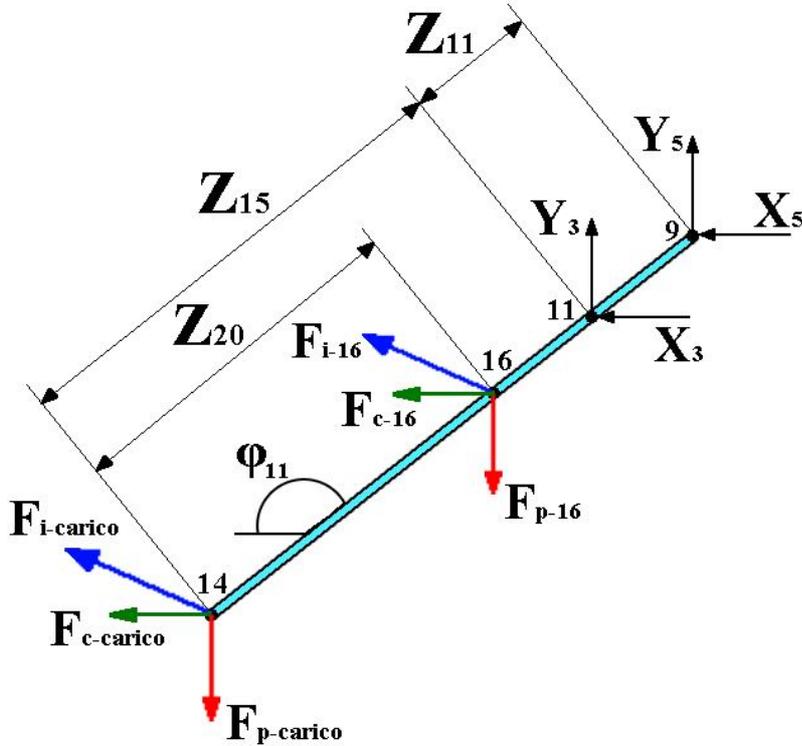


Figura 5.3: schema per l'equilibrio del membro A.

$$\left. \begin{aligned}
 \vec{X}_3 + \vec{X}_5 &= \vec{F}_{l-carico-x} + \vec{F}_{l-16-x} - \vec{F}_{c-carico} - \vec{F}_{c-16} \\
 \vec{Y}_3 + \vec{Y}_5 &= \vec{F}_{l-carico-y} + \vec{F}_{l-16-y} - \vec{F}_{p-carico} - \vec{F}_{p-16} \\
 (\vec{X}_3 * Z_{11} * \sin \varphi_{11}) - (\vec{Y}_3 * Z_{11} * \cos \varphi_{11}) &= \\
 & -(\vec{F}_{l-carico-x} * (Z_{11} + Z_{15}) * \sin \varphi_{11}) + \\
 & -(\vec{F}_{l-16-x} * (Z_{11} + Z_{15} - Z_{20}) * \sin \varphi_{11}) + \\
 & -(-\vec{F}_{l-carico-y} * (Z_{11} + Z_{15}) * \cos \varphi_{11}) + \\
 & -(-\vec{F}_{l-16-y} * (Z_{11} + Z_{15} - Z_{20}) * \cos \varphi_{11}) + \\
 & -(-\vec{F}_{p-carico} * (Z_{11} + Z_{15}) * \cos \varphi_{11}) + \\
 & -(-\vec{F}_{p-16} * (Z_{11} + Z_{15} - Z_{20}) * \cos \varphi_{11}) + \\
 & -(\vec{F}_{c-carico} * (Z_{11} + Z_{15}) * \sin \varphi_{11}) + \\
 & -(\vec{F}_{c-16} * (Z_{11} + Z_{15} - Z_{20}) * \sin \varphi_{11}) + \\
 & + (J_A + M_A * (Z_{15} + Z_{11} - Z_{20})^2) * \vec{\omega}_A
 \end{aligned} \right\} \quad (5.5)$$

### Equilibrio del membro B.

L'equilibrio alla rotazione è effettuato attorno al punto 3.

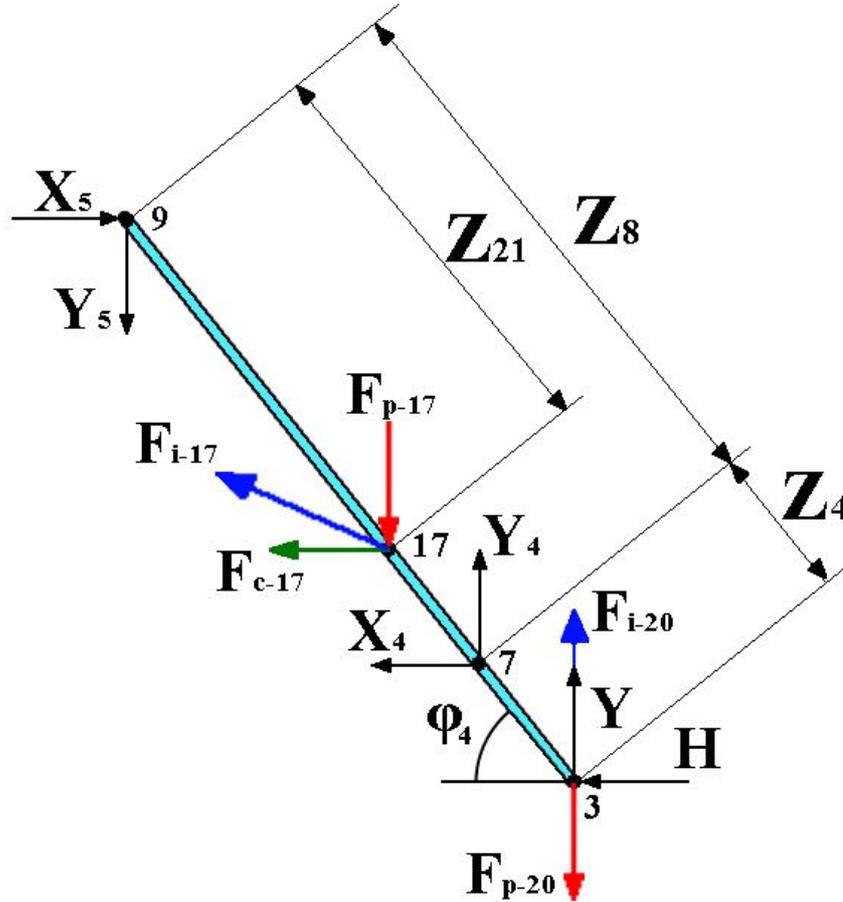


Figura 5.4: schema per l'equilibrio del membro B.

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \vec{X}_4 - \vec{X}_5 + \vec{H} = \overrightarrow{F_{l-17-x}} - \overrightarrow{F_{c-17}} \\
 \vec{Y}_4 - \vec{Y}_5 + \vec{Y} = \overrightarrow{F_{l-17-y}} - \overrightarrow{F_{p-17}} + \overrightarrow{F_{l-20-y}} - \overrightarrow{F_{p-20}} \\
 -(\vec{X}_4 * Z_4 * \sin \varphi_4) + (\vec{Y}_4 * Z_4 * \cos \varphi_4) + \\
 \quad + (\vec{X}_5 * (Z_4 + Z_8) * \sin \varphi_4) + \\
 \quad - (\vec{Y}_5 * (Z_4 + Z_8) * \cos \varphi_4) = \\
 -(\overrightarrow{F_{l-17-x}} * (Z_8 + Z_4 - Z_{21}) * \sin \varphi_4) + \\
 -(\overrightarrow{F_{l-17-y}} * (Z_8 + Z_4 - Z_{21}) * \cos \varphi_4) + \\
 -(\overrightarrow{F_{p-17}} * (Z_8 + Z_4 - Z_{21}) * \cos \varphi_4) + \\
 -(-\overrightarrow{F_{c-17}} * (Z_8 + Z_4 - Z_{21}) * \sin \varphi_4) + \\
 + (J_B + M_B * (Z_8 + Z_4 - Z_{21})^2) * \dot{\omega}_B
 \end{array} \right. \quad (5.6)$$

### Equilibrio del membro C.

L'equilibrio alla rotazione è effettuato attorno al punto 7.

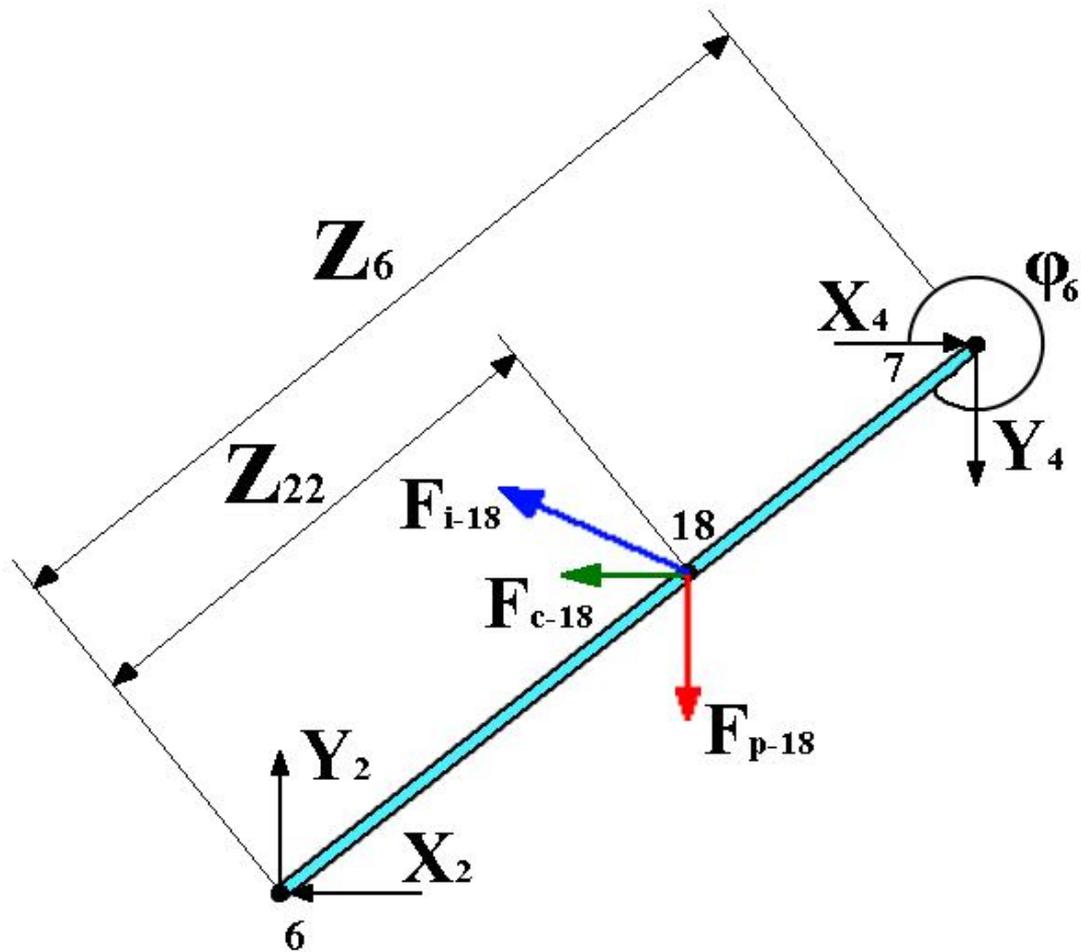


Figura 5.5: schema per l'equilibrio del membro C.

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \vec{X}_2 - \vec{X}_4 = \vec{F}_{l-18-x} - \vec{F}_{c-18} \\
 \vec{Y}_2 - \vec{X}_4 = \vec{F}_{l-18-y} - \vec{F}_{p-18} \\
 -(\vec{X}_2 * Z_6 * \sin \varphi_6) + (\vec{Y}_2 * Z_6 * \cos \varphi_6) = \\
 \quad -(-\vec{F}_{l-18-x} * (Z_6 - Z_{22}) * \sin \varphi_6) + \\
 \quad -(\vec{F}_{l-18-y} * (Z_6 - Z_{22}) * \cos \varphi_6) + \\
 \quad -(\vec{F}_{p-18} * (Z_6 - Z_{22}) * \cos \varphi_6) + \\
 \quad -(-\vec{F}_{c-18} * (Z_6 - Z_{22}) * \sin \varphi_6) + \\
 \quad + (J_C + M_C * (Z_6 - Z_{22})^2) * \dot{\omega}_C
 \end{array} \right. \quad (5.7)$$

### Equilibrio del membro D.

L'equilibrio alla rotazione è effettuato attorno al punto 11.

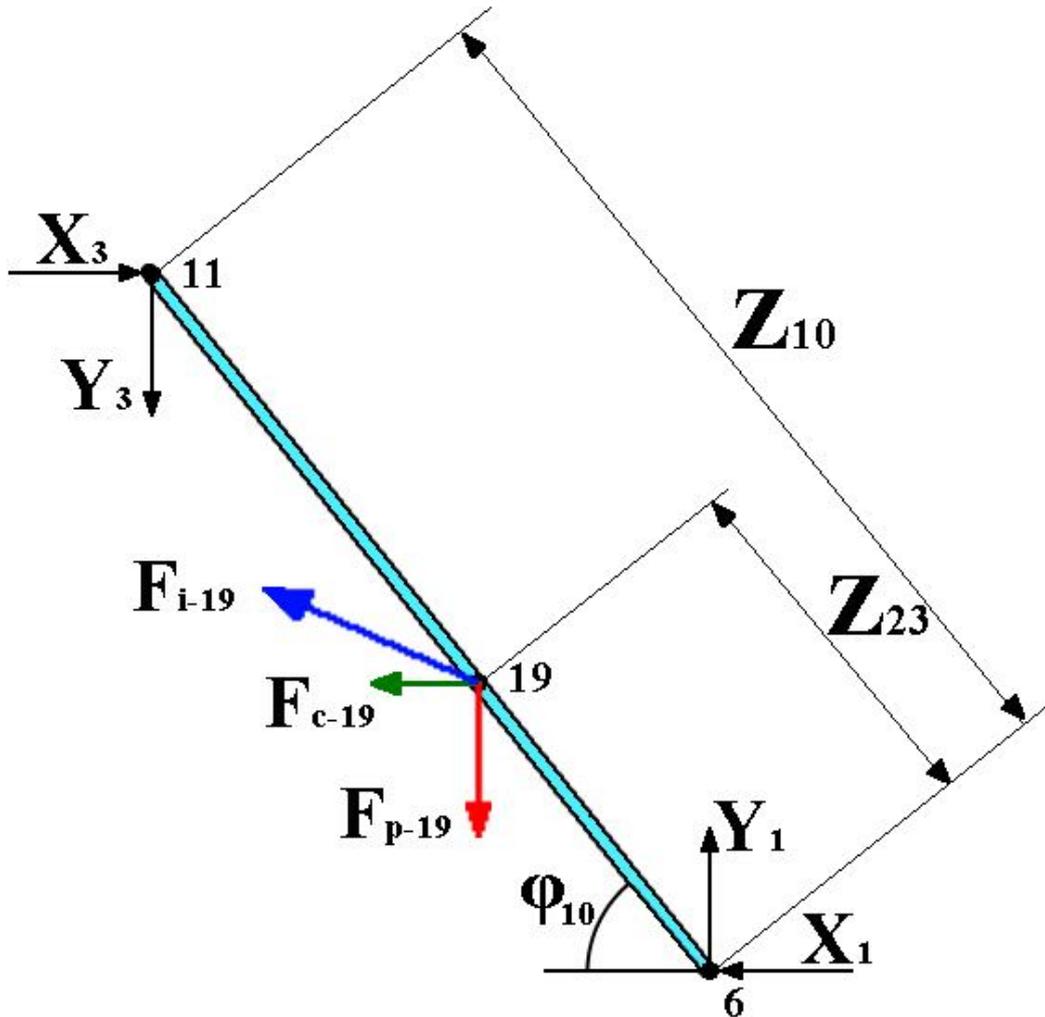


Figura 5.6: schema per l'equilibrio del membro D.

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \overline{X}_1 - \overline{X}_3 = \overline{F_{l-19-x}} - \overline{F_{c-19}} \\
 \overline{Y}_1 - \overline{Y}_3 = \overline{F_{l-19-y}} - \overline{F_{p-19}} \\
 (\overline{X}_1 * Z_{10} * \sin \varphi_{10}) - (\overline{Y}_1 * Z_{10} * \cos \varphi_{10}) = \\
 \quad -(\overline{F_{l-19-x}} * Z_{23} * \sin \varphi_{10}) + \\
 -(-\overline{F_{l-19-y}} * Z_{23} * \cos \varphi_{10}) - \overline{F_{p-19}} * Z_{23} * \cos \varphi_{10} \\
 \quad -(\overline{F_{c-19}} * Z_{23} * \sin \varphi_{10}) + \\
 + (J_D + M_D * (Z_{10} - Z_{23})^2) * \dot{\omega}_D
 \end{array} \right. \quad (5.8)$$

### Equilibrio al nodo 6.

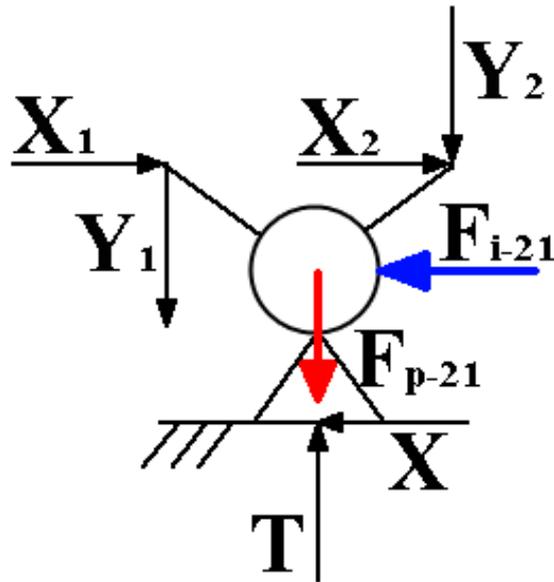


Figura 5.7: schema per l'equilibrio al nodo.

$$\begin{cases} \vec{X} - \vec{X}_1 - \vec{X}_2 = \vec{F}_{i-21-x} \\ \vec{T} - \vec{Y}_1 - \vec{Y}_2 = -\vec{F}_{p-21} \end{cases} \quad (5.9)$$

Mettendo insieme tutte le equazioni, si ottengono 14 equazioni linearmente indipendenti in 14 incognite. Utilizzando Matlab come programma di calcolo, è immediato scrivere le equazioni nella classica forma matriciale:

$$\bar{A}\bar{X} = \bar{B} \quad (5.10)$$

Dove A è la matrice dei coefficienti, X il vettore delle incognite e B il vettore dei termini noti. La risoluzione avviene attraverso l'inversa di A;

$$\bar{X} = (\bar{A}^{-1}) * \bar{B} \quad (5.11)$$



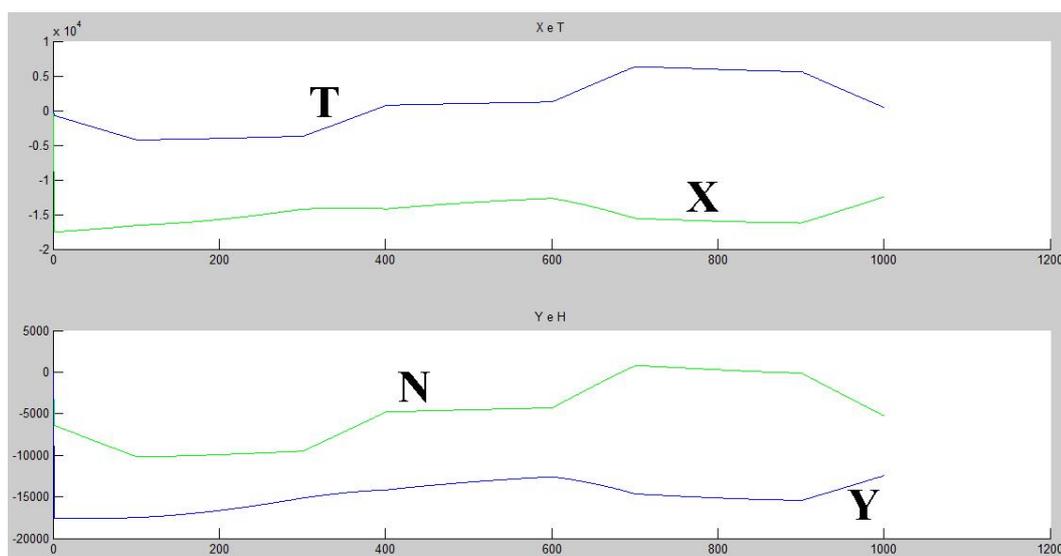
$$\begin{aligned}
& \overrightarrow{F_{l-carico-x}} + \overrightarrow{F_{l-16-x}} - \overrightarrow{F_{c-carico}} - \overrightarrow{F_{c-16}} \\
& \overrightarrow{F_{l-carico-y}} + \overrightarrow{F_{l-16-y}} - \overrightarrow{F_{p-carico}} - \overrightarrow{F_{p-16}} \\
& -(\overrightarrow{F_{l-carico-x}} * (Z_{11} + Z_{15}) * \sin \varphi_9) + \\
& -(\overrightarrow{F_{l-16-x}} * (Z_{11} + Z_{15} - Z_{20}) * \sin \varphi_9) + \\
& -(\overrightarrow{F_{l-carico-y}} * (Z_{11} + Z_{15}) * \cos \varphi_9) + \\
& -(\overrightarrow{F_{l-16-y}} * (Z_{11} + Z_{15} - Z_{20}) * \cos \varphi_9) + \\
& -(\overrightarrow{F_{p-carico}} * (Z_{11} + Z_{15}) * \cos \varphi_9) + \\
& -(\overrightarrow{F_{p-16}} * (Z_{11} + Z_{15} - Z_{20}) * \cos \varphi_9) + \\
& -(\overrightarrow{F_{c-carico}} * (Z_{11} + Z_{15}) * \sin \varphi_{11}) + \\
& -(\overrightarrow{F_{c-16}} * (Z_{11} + Z_{15} - Z_{20}) * \sin \varphi_{11}) + \\
& + (J_A + M_A * (Z_{15} + Z_{11} - Z_{20})^2) * \vec{\omega}_A \\
& \overrightarrow{F_{l-17-x}} - \overrightarrow{F_{c-17}} \\
& \overrightarrow{F_{l-17-y}} - \overrightarrow{F_{p-17}} \\
& -(\overrightarrow{F_{l-17-x}} * (Z_8 + Z_4 - Z_{21}) * \sin \varphi_4) + \\
& -(\overrightarrow{F_{l-17-y}} * (Z_8 + Z_4 - Z_{21}) * \cos \varphi_4) + \\
& -(\overrightarrow{F_{p-17}} * (Z_8 + Z_4 - Z_{21}) * \cos \varphi_4) + \\
& -(\overrightarrow{F_{c-17}} * (Z_8 + Z_4 - Z_{21}) * \sin \varphi_4) + \\
& + (J_B + M_B * (Z_8 + Z_4 - Z_{21})^2) * \vec{\omega}_B \\
& \overrightarrow{F_{l-18-x}} - \overrightarrow{F_{c-18}} \\
& \overrightarrow{F_{l-18-y}} - \overrightarrow{F_{p-18}} \\
& -(\overrightarrow{F_{l-18-x}} * (Z_6 - Z_{22}) * \sin \varphi_6) + \\
& -(\overrightarrow{F_{l-18-y}} * (Z_6 - Z_{22}) * \cos \varphi_6) + \\
& -(\overrightarrow{F_{p-18}} * (Z_6 - Z_{22}) * \cos \varphi_6) + \\
& -(\overrightarrow{F_{c-18}} * (Z_6 - Z_{22}) * \sin \varphi_6) + \\
& + (J_C + M_C * (Z_6 - Z_{22})^2) * \vec{\omega}_C \\
& \overrightarrow{F_{l-19-x}} - \overrightarrow{F_{c-19}} \\
& \overrightarrow{F_{l-19-y}} - \overrightarrow{F_{p-19}} \\
& -(\overrightarrow{F_{l-19-x}} * Z_{23} * \sin \varphi_{10}) + \\
& -(\overrightarrow{F_{l-19-y}} * Z_{23} * \cos \varphi_{10}) - (\overrightarrow{F_{p-19}} * Z_{23} * \cos \varphi_{10}) + \\
& -(\overrightarrow{F_{c-19}} * Z_{23} * \sin \varphi_{10}) + \\
& + (J_D + M_D * (Z_{10} - Z_{23})^2) * \vec{\omega}_D \\
& \overrightarrow{F_{l-20-x}} \\
& -\overrightarrow{F_{p-20}}
\end{aligned}$$

$\vec{B} =$

Quelle ora indicate come  $\vec{X}$  e  $\vec{Y}$  sono intese come reazioni nel sistema isostatico. Nel sistema labile  $-\vec{X}$  e  $-\vec{Y}$  sono le azioni che permettono di muovere il robot. D'ora in poi, per una questione di chiarezza, verranno indicate con  $\vec{X}$  e  $\vec{Y}$  le forze motrici del manipolatore. Si tiene a precisare che  $\vec{X}$  e  $\vec{Y}$  sono viste come forze motrici dal robot, mentre dagli azionamenti sono visti come azioni resistenti.

Qui di seguito sono riportate la variazioni delle azioni motrici e delle reazioni vincolari in un esempio generico di movimentazione contemporanea sia del movente x ( $\vec{Z}_2$ ) che del movente y ( $\vec{Z}_1$ ). I due piani cartesiani hanno in ascissa il tempo espresso rispetto al numero di campionamento e in ordinata le forze motrici e le reazioni vincolari in Newton.

Lo script che esegue i conti dell'analisi dinamica inversa riferita alla movimentazione nel piano (X,Y) è riportato in appendice B.



**Figura 5.8: azioni motrici e reazioni vincolari di un caso generico di movimentazione del movente x che del movente y in contemporanea.**

### 5.1.2 Accoppiamento motore-riduttore-carico nella movimentazione x e y

Conoscendo gli organi di trasmissione installati si possono ricondurre le forze  $\vec{X}$  e  $\vec{Y}$  alle coppie che i motori brushless devono erogare.

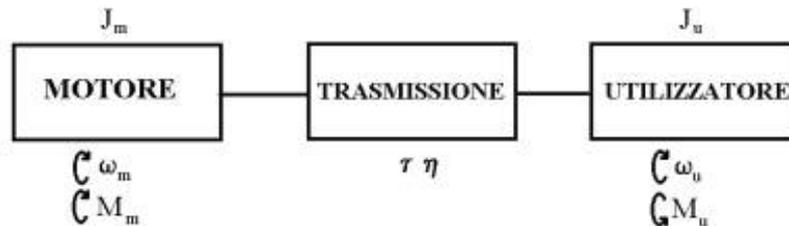


Figura 5.9: schema generico motore-riduttore-carico.

Qui di seguito vengono ripresi i valori caratteristici degli organi di trasmissione che già erano stati presentati nel terzo capitolo.

	Cinghia		Vite a ricircolo di sfere	
	Numero denti		Diametro	Passo
	Motrice	Condotta	[mm]	[mm]
Movimentazione X	$Z_{mot\_x}=28$	$Z_{cond\_x}=56$	$d_x=50$	$P_x=10$
Movimentazione Y	$Z_{mot\_y}=36$	$Z_{cond\_y}=80$	$d_y=50$	$P_y=20$

Tabella 5.1: parametri caratteristici degli organi di trasmissione.

La vite a ricircolo di sfera ha come compito quello di trasformare un moto rotatorio in un moto traslatorio o viceversa. Nel caso in esame il movente è la rotazione della madrevite e il cedente è la traslazione della chiocciola. Prima di esporre il rapporto tra la coppia impressa alla madrevite e la forza impressa dalla chiocciola in entrambi i moventi, si definisce il rendimento teorico:

$$\eta_x = \frac{\tan(\xi_x)}{\tan(\xi_x + \rho)} = 0,9144 \quad \eta_y = \frac{\tan(\xi_y)}{\tan(\xi_y + \rho)} = 0,9547 \quad (5.12)$$

Dove  $\rho$  è pari a  $0.34^\circ$  e  $\xi_x$  e  $\xi_y$  sono:

$$\tan(\xi_x) = \frac{P_x}{d_x * \pi} = 0,0637 \quad \tan(\xi_y) = \frac{P_y}{d_y * \pi} = 0,1273 \quad (5.13)$$

Detti  $\eta_{p_x}$  e  $\eta_{p_y}$  i rendimenti pratici e posto  $F_l = 0,95$  il fattore di carico:

$$\eta_{p_x} = 0.95 * \eta_x * F_l = 0,825 \quad \eta_{p_y} = 0.95 * \eta_y * F_l = 0,862 \quad (5.14)$$

vengono esposti il rapporto tra coppia e forza presenti nelle viti a ricircolo di sfere.

$$C_{madrevite_x} = \frac{\vec{X} * P_x}{2000 * \pi * \eta_{p_x}} \quad (5.15)$$

$$C_{madrevite_y} = \frac{\vec{Y} * P_y}{2000 * \pi * \eta_{p_y}} \quad (5.16)$$

Dal punto di vista delle relazioni cinematiche tra rotazione e traslazione, essendo entrambe le madreviti ad un principio, risulta ovvio che ogni rotazione completa della madrevite corrisponda una traslazione della chiocciola di un passo. In generale si può scrivere, ponendo  $\alpha_x$  e  $\alpha_y$  le generiche rotazioni delle madreviti ed  $x$  e  $y$  le corrispondenti traslazioni:

$$\frac{\alpha_x}{x} = \frac{2\pi}{P_x} \quad \frac{\alpha_y}{y} = \frac{2\pi}{P_y} \quad (5.17)$$

Da cui:

$$\alpha_x = \frac{2\pi}{P_x} * x \quad \alpha_y = \frac{2\pi}{P_y} * y \quad (5.18)$$

$$\dot{\alpha}_x = \frac{2\pi}{P_x} * \dot{x} \quad \dot{\alpha}_y = \frac{2\pi}{P_y} * \dot{y} \quad (5.19)$$

$$\ddot{\alpha}_x = \frac{2\pi}{P_x} * \ddot{x} \quad \ddot{\alpha}_y = \frac{2\pi}{P_y} * \ddot{y} \quad (5.20)$$

Le cinghie impongono un rapporto di trasmissione pari a :

$$\tau_x = \frac{\omega_{cond\_x}}{\omega_{mot\_x}} = \frac{C_{mot\_x}}{C_{cond\_x}} = \frac{Z_{mot\_x}}{Z_{cond\_x}} = \frac{28}{56} = 0,5 \quad (5.21)$$

$$\tau_y = \frac{\omega_{cond\_y}}{\omega_{mot\_y}} = \frac{C_{mot\_y}}{C_{cond\_y}} = \frac{Z_{mot\_y}}{Z_{cond\_y}} = \frac{36}{80} = 0,45 \quad (5.22)$$

I rendimenti della trasmissione con cinghia sono  $\eta_{cinghia\_x} = \eta_{cinghia\_y} = 0,97$

Nell'azionamento della movimentazione orizzontale, le inerzie considerate sono:

$$\begin{aligned} J_{madrevite\_x} &= \text{inerzia madre vite} = 0,002 \text{ kg} * \text{m}^2 \\ J_{pul\_cond\_x} &= \text{inerzia puleggia condotta} = 0,005 \text{ kg} * \text{m}^2 \\ J_{pul\_mot\_x} &= \text{inerzia puleggia motrice} = 0,001 \text{ kg} * \text{m}^2 \\ J_{motore\_x} &= \text{inerzia rotore motore elettrico} = 0,002 \text{ kg} * \text{m}^2 \end{aligned}$$

Nell'azionamento della movimentazione verticale, le inerzie considerate sono:

$$\begin{aligned} J_{madrevite\_y} &= \text{inerzia madre vite} = 0,004 \text{ kg} * \text{m}^2 \\ J_{pul\_cond\_y} &= \text{inerzia puleggia condotta} = 0,003 \text{ kg} * \text{m}^2 \\ J_{pul\_mot\_y} &= \text{inerzia puleggia motrice} = 0,001 \text{ kg} * \text{m}^2 \\ J_{motore\_y} &= \text{inerzia rotore motore elettrico} = 0,006 \text{ kg} * \text{m}^2 \end{aligned}$$

Ora i due sistemi originali vengono riscritti come due sistemi ridotti agli assi motori. Il principio per cui questa riduzione è possibile è l'invarianza della energia cinetica. I sistemi ridotti sono governati dalla seguente formula:

$$C_{m\_x} - C_{r\_rid\_x} = J_{eq\_x} * \dot{\omega}_{m\_x} \quad (5.23)$$

$$C_{m\_y} - C_{r\_rid\_y} = J_{eq\_y} * \dot{\omega}_{m\_y} \quad (5.24)$$

dove con  $\dot{\omega}_{m_x} = \left(\frac{2\pi}{P_x \cdot \tau_x}\right) * \ddot{z}_2$  e con  $\dot{\omega}_{m_y} = \left(\frac{2\pi}{P_y \cdot \tau_y}\right) * \ddot{z}_1$  sono intese le accelerazioni angolari degli alberi motore,  $C_{m_x}$  e  $C_{m_y}$  le coppie motrici,  $C_{r_{rid_x}}$  e  $C_{r_{rid_y}}$  le coppie resistenti ridotte all'albero motore,  $J_{eq_x}$  e  $J_{eq_y}$  i momenti di inerzia ridotti all'albero motore. Le coppie resistenti non ancora ridotte sono  $C_{r_x} = C_{madrevite_x}$  e  $C_{r_y} = C_{madrevite_y}$ .

Per trovare le relazioni tra le coppie resistenti e i momenti di inerzia originali con quelli ridotti si passa attraverso l'uguaglianza di potenze. Ovviamente è inutile farlo per le coppie motrici dato che le uniche coppie applicabili agli alberi motori sono quelle dei motori brushless. Definisco  $\omega_{u_x}$  e  $\omega_{u_y}$  le velocità angolari agli alberi condotti (il pedice u sta per utilizzatore).

Potenza resistente ridotta all'albero motore x:

$$\begin{aligned} C_{r_{rid_x}} * \omega_{m_x} &= \frac{C_{r_x} * \omega_{u_x}}{\eta_{cinghia_x}} = \frac{C_{madrevite_x} * \omega_{u_x}}{\eta_{cinghia_x}} \\ &= \frac{C_{madrevite_x} * \omega_{m_x} * \tau_x}{\eta_{cinghia_x}} \end{aligned} \quad (5.25)$$

Quindi:

$$C_{r_{rid_x}} = \frac{C_{madrevite_x} * \tau_x}{\eta_{cinghia_x}} \quad (5.26)$$

Momento inerzia ridotto all'albero motore x:

$$\begin{aligned} &J_{eq_x} * \dot{\omega}_{m_x} * \omega_{m_x} \\ &= (J_{motore_x} + J_{mot_x}) * \dot{\omega}_{m_x} * \omega_{m_x} \\ &+ (J_{madrevite_x} + J_{cond_x}) * \dot{\omega}_{u_x} * \omega_{u_x} = \\ &= (J_{motore_x} + J_{mot_x}) * \dot{\omega}_{m_x} * \omega_{m_x} \\ &+ \left( \frac{(J_{madrevite_x} + J_{cond_x}) * \dot{\omega}_{m_x} * \omega_{m_x} * \tau_x^2}{\eta_{cinghia_x}} \right) \end{aligned} \quad (5.27)$$

Quindi:

$$J_{eq\_x} = (J_{motore\_x} + J_{mot\_x}) + \left( \frac{(J_{madrevite\_x} + J_{cond\_x}) * \tau_x^2}{\eta_{cinghia\_x}} \right) \quad (5.28)$$

In conclusione:

$$C_{m\_x} = \left( \frac{C_{madrevite\_x} * \tau_x}{\eta_{cinghia\_x}} \right) + ((J_{motore\_x} + J_{mot\_x}) + \left( \frac{(J_{madrevite\_x} + J_{cond\_x}) * \tau_x^2}{\eta_{cinghia\_x}} \right)) * \dot{\omega}_{m\_x} \quad (5.29)$$

Ripetendo gli stessi passaggi anche per l'albero y:

$$C_{m\_y} = \left( \frac{C_{madrevite\_y} * \tau_y}{\eta_{cinghia\_y}} \right) + ((J_{motore\_y} + J_{mot\_y}) + \left( \frac{(J_{madrevite\_y} + J_{cond\_y}) * \tau_y^2}{\eta_{cinghia\_y}} \right)) * \dot{\omega}_{m\_y} \quad (5.30)$$

Le velocità angolari degli assi motori sono:

$$\omega_{m\_x} = \left( \frac{2\pi}{P_x * \tau_x} \right) * \dot{z}_2 \quad (5.31)$$

$$\omega_{m\_y} = \left( \frac{2\pi}{P_y * \tau_y} \right) * \dot{z}_1 \quad (5.32)$$

Nelle due figure sottostanti sono riportati il luoghi dei carichi ridotti agli alberi motori di un caso generico di movimentazione in contemporanea sia del movente x che del movente y. I due piani cartesiani hanno in ascissa le velocità angolari espresse in giri al minuto e in ordinata le coppie resistenti espresse in Nm. Gli script riferiti agli azionamenti orizzontale e verticale sono riportati in appendice D. In esso vengono calcolati anche le due coppie di valori quadratici medi di coppia e velocità.

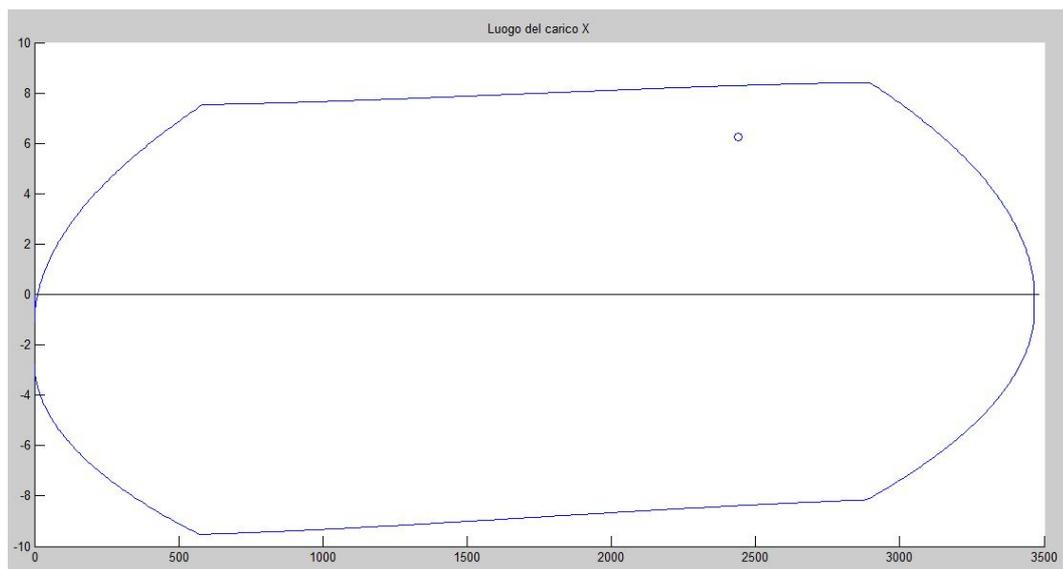
$$C_{m_x,rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T C_{m_x}^2 dt} \quad (5.33)$$

$$\omega_{m_x,rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \omega_{m_x}^2 dt} \quad (5.34)$$

$$C_{m_y,rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T C_{m_y}^2 dt} \quad (5.35)$$

$$\omega_{m_y,rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \omega_{m_y}^2 dt} \quad (5.36)$$

Questi punti nel grafico vengono raffigurati con un cerchietto nel piano cartesiano  $(\omega_{m_x}, C_{m_x})$  e  $(\omega_{m_y}, C_{m_y})$ .



**Figura 5.10: luogo dei carichi ridotti all'asse motore x.**

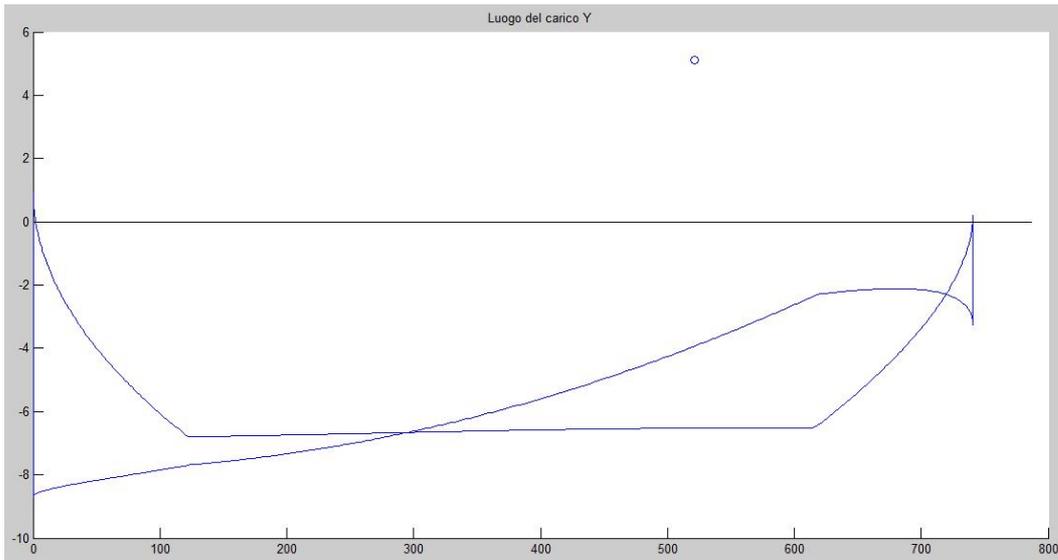


Figura 5.11: luogo dei carichi ridotti all'asse motore y.

## 5.2 Dinamica relativa alla rotazione della torretta

### 5.2.1 Analisi dinamica attraverso la legge di Newton

Nell'affrontare la dinamica relativa alla rotazione della torretta ci si è avvalsi della legge di Newton per i moti di rotazione:

$$C_{utilizzatore} - C_{resistente} = J_{utilizzatore} * \dot{\omega}_u \quad (5.37)$$

La formula precedente viene applicata come se si fosse di fronte ad un caso puramente inerziale:

$$C_{utilizzatore} = J_{utilizzatore} * \dot{\omega}_u \quad (5.38)$$

L'obiettivo è quello di trovare la coppia motrice necessaria per ruotare l'intero robot con una movimentazione angolare prefissata. La  $C_{utilizzatore}$  è la coppia che devo applicare all'asse condotto. Con  $J_{utilizzatore}$  è inteso il momento di inerzia che bisogna vincere per fare ruotare il robot attorno all'asse verticale. Con  $\dot{\omega}_u$  è indicata l'accelerazione angolare della torretta.

Il programma in Matlab che è stato creato per poter calcolare la coppia motrice si appoggia su una parte dei calcoli cinematici, in particolare su

quella delle posizione dei giunti e dei baricentri. Dalla meccanica razionale si ricorda che il momento di inerzia di un punto con massa  $M$  e distante dall'asse di rotazione  $r$  è pari a:

$$J = M * r^2 \quad (5.39)$$

Il momento di inerzia totale del robot è quindi la sommatoria dei momenti di inerzia rispetto all'asse di rotazione della torretta. Le masse prese in considerazione sono quelle delle leve pesanti, dei motori elettrici presenti nella torretta e il momento di inerzia della struttura della torretta.

$M_A =$  massa del membro A = 60 Kg

$M_B =$  massa del membro B = 120 Kg

$M_C =$  massa del membro C = 30 Kg

$M_D =$  massa del membro D = 100 Kg

$M_{mot\_x} =$  massa del motore elettrico  
per movimentazione in X = 5 Kg

$M_{mot\_y} =$  massa del motore elettrico  
per movimentazione in Y = 13 Kg

$M_{mot\_rot} =$  massa del motore elettrico  
per rotazione torretta = 13 Kg

$J_{torretta} =$  momento d'inerzia torretta = 72 Kg \* m<sup>2</sup>

$r_A =$  raggio del baricentro del membro A in metri

$r_B =$  raggio del baricentro del membro B in metri

$r_C =$  raggio del baricentro del membro C in metri

$r_D =$  raggio del baricentro del membro D in metri

$r_{carico} =$  raggio del carico in metri

$r_{mot\_x} =$  raggio del baricentro del motore X in metri

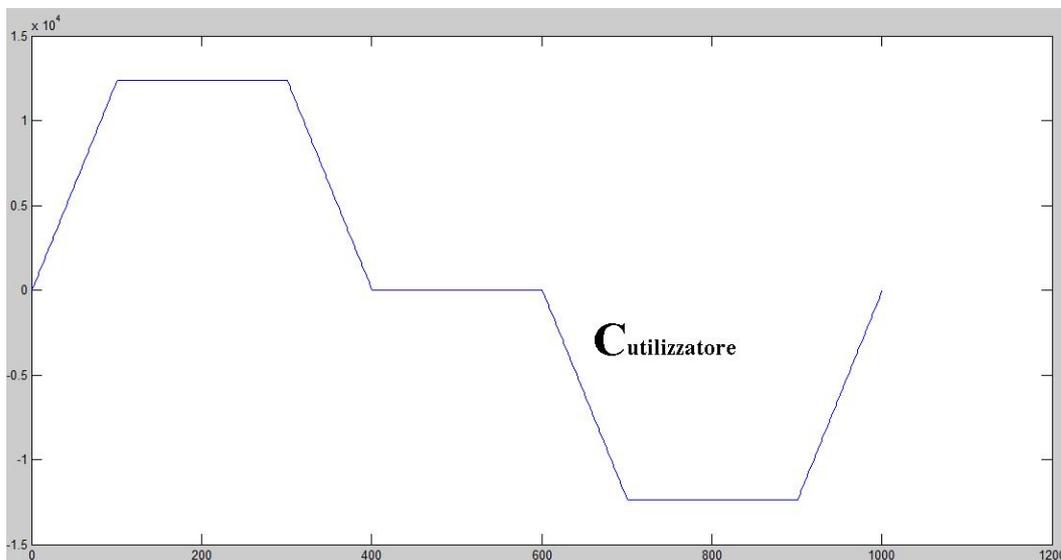
$r_{mot\_y} =$  raggio del baricentro del motore Y in metri

$r_{mot\_rot} =$  raggio del baricentro del motore  
rotazione torretta in metri

In definitiva, il momento di inerzia totale dell'utilizzatore è:

$$\begin{aligned}
 J_{utilizzatore} = & (M_{carico} * r_{carico}^2) + (M_A * r_A^2) + (M_B * r_B^2) \\
 & + (M_C * r_C^2) + (M_D * r_D^2) + (M_{mot\_x} * r_{mot\_x}^2) \\
 & + (M_{mot\_y} * r_{mot\_y}^2) + (M_{mot\_rot} * r_{mot\_rot}^2) \\
 & + J_{torretta}
 \end{aligned}
 \tag{5.40}$$

Risulta immediato calcolare la coppia utilizzatore  $C_{utilizzatore} = J_{utilizzatore} * \dot{\omega}_u$  quando si conosce la movimentazione angolare desiderata. Di seguito viene riportato un esempio di coppia utilizzatore che varia nel tempo, dopo aver impostato una rotazione tipica del robot con legge di moto a sette tratti con accelerazione lineare. I due piani cartesiani hanno in ascissa il tempo espresso rispetto al numero di campionamento e in ordinata le forze motrici o vincolari in Newton. Lo script che esegue i conti dell'analisi dinamica riferita alla movimentazione della torretta è riportato in appendice B.



**Figura 5.12:** andamento esemplificativo della coppia utilizzatore nel tempo.

## 5.2.2 Accoppiamento motore-riduttore-carico nella movimentazione della torretta

Come in precedenza viene utilizzato il classico schema motore-riduttore-utilizzatore per trovare la coppia effettiva richiesta al motore elettrico.

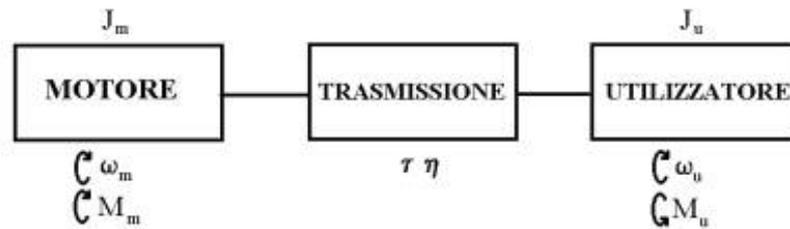


Figura 5.13: schema generico motore-riduttore-carico.

Vengono riportate qui di seguito le caratteristiche degli organi di trasmissione presenti in questo azionamento:

- Trasmissione a cinghia con numero di denti della ruota motrice pari a 40 e numero di denti della ruota condotta pari a 56. Il rapporto di trasmissione è pari a  $\tau_{cinghia} = \frac{40}{56}$ . Il rendimento della trasmissione con cinghia sono  $\eta_{cinghia} = 0,97$ .
- Riduttore Cyclo F2CF-C55-90 con rapporto di riduzione pari a  $\tau_{cyclo} = \frac{1}{90}$ . Il rendimento  $\eta_{cyclo} = 0,7$

Il rapporto di trasmissione totale è:

$$\tau_{tot} = \tau_{cinghia} * \tau_{cyclo} \quad (5.41)$$

Il rendimento degli organi di trasmissione totale è:

$$\eta_{tot} = \eta_{cinghia} * \eta_{cyclo} \quad (5.42)$$

Nell'albero condotto i momenti di inerzia presenti sono:

$$J_{cyclo} = \text{momento d'inerzia cyclo} = 0,0114 \text{ kg} * \text{m}^2$$

$$J_{pul\_cond} = \text{momento d'inerzia torretta} = 0,002 \text{ kg} * \text{m}^2$$

Per quel che riguarda l'albero motore i momenti di inerzia presi in considerazione sono quelli del motore e dalla puleggia motrice:

$$J_{motore\_torretta} = \text{momento d'inerzia del motore elettrico} = 0,002 \text{ kg} * \text{mm}^2$$

$$J_{pul\_mot} = \text{momento d'inerzia torretta} = 0,006 \text{ kg} * \text{m}^2$$

Potenza resistente ridotta all'albero motore della torretta:

$$C_{r\_rid} * \omega_m = \frac{C_r * \omega_u}{\eta_{tot}} = \frac{C_{utilizzatore} * \omega_u}{\eta_{tot}}$$

$$= \frac{C_{utilizzatore} * \omega_m * \tau_{tot}}{\eta_{tot}} \quad (5.43)$$

dove con  $\omega_m$  è indicata la velocità angolare dell'albero motore.

$$C_{r\_rid\_x} = \frac{C_{utilizzatore} * \tau_{tot}}{\eta_{tot}} \quad (5.44)$$

Momento inerzia ridotto all'albero motore della torretta:

$$J_{eq} * \dot{\omega}_m * \omega_m = (J_{motore\_torretta} + J_{pul\_mot}) * \dot{\omega}_m * \omega_m$$

$$+ (J_{cyclo} + J_{pul\_cond}) * \dot{\omega}_u * \omega_u =$$

$$= ((J_{motore\_torretta} + J_{pul\_mot}) + \frac{(J_{cyclo} + J_{pul\_cond}) * \tau_{tot}^2}{\eta_{tot}}) * \dot{\omega}_m * \omega_m \quad (5.45)$$

In conclusione:

$$C_{m\_torreta} = \left( \frac{C_{utilizzatore} * \tau_{tot}}{\eta_{tot}} \right) + \left( \frac{(J_{cyclo} + J_{pul\_cond}) * \tau_{tot}^2}{\eta_{tot}} \right) + (J_{motore\_torretta} + J_{pul\_mot}) * \dot{\omega} \quad (5.46)$$

Ricordando che l'angolo della torretta è definito con  $\delta_y$ , quindi la velocità angolare del robot è  $\dot{\delta}_y$ , la velocità angolare dell'albero motore che permettere di far ruotare il manipolatore sull'asse verticale è pari a:

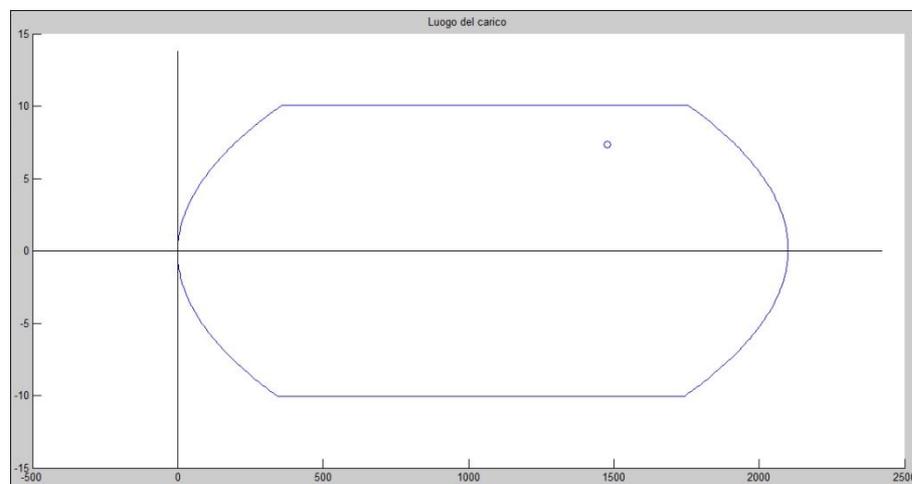
$$\omega_{m\_torretta} = \frac{\dot{\delta}_y}{\tau_{tot}} \quad (5.47)$$

Nelle due figure sottostanti sono riportati il luoghi dei carichi ridotti all'albero motore di un caso generico di movimentazione della torretta. Il piano cartesiano ha in ascissa la velocità angolare espressa in giri al minuto e in ordinata la coppia resistente espressa in Nm. Lo script riferito all'azionamento della torretta è riportato in appendice E. In esso viene calcolata anche la coppia di valori quadratici medi di coppia e velocità.

$$C_{m\_torretta,rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T C_{m\_torretta}^2 dt} \quad (5.48)$$

$$\omega_{m\_torretta,rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \omega_{m\_torretta}^2 dt} \quad (5.49)$$

Questo punto nel grafico viene raffigurato con un cerchietto nel piano cartesiano ( $\omega_{m\_torretta}, C_{m\_torretta}$ )



**Figura 5.14: luogo dei carichi ridotti all'asse motore.**



## Capitolo 6

### MAPPATURA ED ANALISI DATI

#### 6.1 Mappatura relativa al piano (X,Y)

##### 6.1.1 Impostazione generale

La mappatura si prefigge di effettuare il maggior numero di movimentazioni orizzontali e verticali della pinza e rotazione della torretta in combinazione tra loro con lo scopo di verificare la scelta dei motori elettrici da parte dell'azienda Paglierani. E' nata la necessità di realizzare questo algoritmo di prova perché era impossibile a priori conoscere quale movimentazione singola o quale combinazione di movimentazioni avrebbe sollecitato maggiormente ogni singolo motore elettrico. La mappatura si basa inizialmente sulla suddivisione in parti uguali dei moventi x, y. Analogamente allo script di Matlab, vengono definiti:

$$\begin{aligned}n_x &= \text{numero di punti raggiungibili dal movente } x \\n_y &= \text{numero di punti raggiungibili dal movente } y\end{aligned}$$

Conoscendo lo spazio dei singoli giunti prismatici x e y, risulta immediato definire la lunghezza delle singole suddivisioni. Nelle prossime formule si fa riferimento alla lunghezza dei vettori  $\vec{Z}_1$  e  $\vec{Z}_2$  per riferirsi rispettivamente ai moventi x e y:

$$\Delta Z_1 = \frac{Z_{1\_max}}{n_y - 1} \quad (6.1)$$

$$\Delta Z_2 = \frac{Z_{2\_max}}{n_x - 1} \quad (6.2)$$



L'appena esposta suddivisione non è valida per le rotazione della torretta. Per essa sono stati impostati tre movimenti: il primo impone che il robot non ruoti attorno all'asse verticale, la seconda impone una rotazione da 0° a 90°, la terza impone una rotazione da 0° a 180°. Come può confermare lo script di Matlab in Appendice G, i movimenti di andata e ritorno dei moventi x e y sono stati combinati tra loro come riportato in tabella 6.1.

1)	Andata x	Andata y
2)	Andata x	Ritorno y
3)	Ritorno x	Andata y
4)	Ritorno x	Ritorno y

**Tabella 6.1: combinazione dei movimenti dei moventi x e y.**

Per ogni combinazione di movimentazione vengono salvati la coppia motrice massima, la coppia motrice rms, la velocità angolare massima e la velocità angolare rms. Dopo aver effettuato tutte le combinazioni, delle coppie motrici massime e delle velocità angolari massime vengono presi i valori massimi, delle coppie motrici rms e delle velocità angolari rms se ne fa una media. Questi ultimi due valori sono indicativi in quanto comprendono tutte le combinazioni di movimentazioni. Per una analisi più specifica bisogna conoscere il ciclo di pallettizzazione completo di cui si vuole fare lo studio.

Come suggerito dallo studio del testo sugli azionamenti elettrici, è definito come coppia di picco in presenza di cicli di lavoro dinamici, non quella indicata in targa dal costruttore, ma si prende il doppio di quella nominale.

La verifica dei motori esistenti è effettuata nel seguente modo:

- confronto tra la coppia di picco del motore e il valore massimo di coppia motrice richiesta.
- confronto tra la velocità angolare massima del motore e la velocità angolare massima richiesta.
- confronto tra i valori di coppia e velocità angolare nominale con i valori medi di coppie motrici rms e velocità angolari rms.

Vengono indicati con  $N_{x\_and}$  e  $N_{y\_and}$  il numero di movimentazioni in andata che si ottengono impostando  $n_x$  e  $n_y$  punti raggiungibili dai moventi:

$$N_{x\_and} = \sum_{i=0}^{n_x-1} (n_x - i) \quad (6.3)$$

$$N_{y\_and} = \sum_{i=0}^{n_y-1} (n_y - i) \quad (6.4)$$

Nelle fasi di ritorno il numero di movimentazioni è ridotto in quanto non vengono presi in considerazione i movimenti stazionari dei moventi. Quindi:

$$N_{x\_rit} = -n_x + \sum_{i=0}^{n_x-1} (n_x - i) \quad (6.5)$$

$$N_{y\_rit} = -n_y + \sum_{i=0}^{n_y-1} (n_y - i) \quad (6.6)$$

Questi valori daranno un'idea del costo computazionale richiesto al calcolatore per eseguire i calcoli.

### 6.1.2 Raccolta dati della mappatura relativa al piano (X,Y)

La raccolta dati relativa al piano (X,Y) è stata effettuata impostando questi valori:

- Numero di campionamento = 50: è stato scelto questo valore perché, attraverso alcune prove, si è verificato che risponde in modo adeguato al compromesso tra precisione dei risultati e costo computazionale.
- Tempo ciclo = 2,2 secondi: è un valore medio tra i tempi di pallettizzazione che più frequentemente si realizzano all'interno degli impianti.

- $n_x = 8 \rightarrow N_{x\_and} = 36, N_{x\_rit} = 28$
- $n_y = 8 \rightarrow N_{y\_and} = 36, N_{y\_rit} = 28$

Sono stati valutati cinque carichi differenti: pinza vuota, 25 Kg, 50 Kg, 100 Kg, 150 Kg. Questi valori si riferiscono al carico da trasportare ed è esclusa la massa della pinza.

Il numero di combinazioni totali risulta essere:

$$\begin{aligned}
 N_{tot} &= 3 * [(N_{x\_and} * N_{y\_and}) + (N_{x\_rit} * N_{y\_and}) + (N_{x\_and} * N_{y\_rit}) + (N_{x\_rit} * N_{y\_rit})] & (6.7) \\
 &= 3 * [(36 * 36) + (28 * 36) + (36 * 28) + (28 * 28)] = 12288 \text{ combinazioni}
 \end{aligned}$$

Dove il 3 che moltiplica la parentesi quadrata indica le tre rotazioni della torretta.

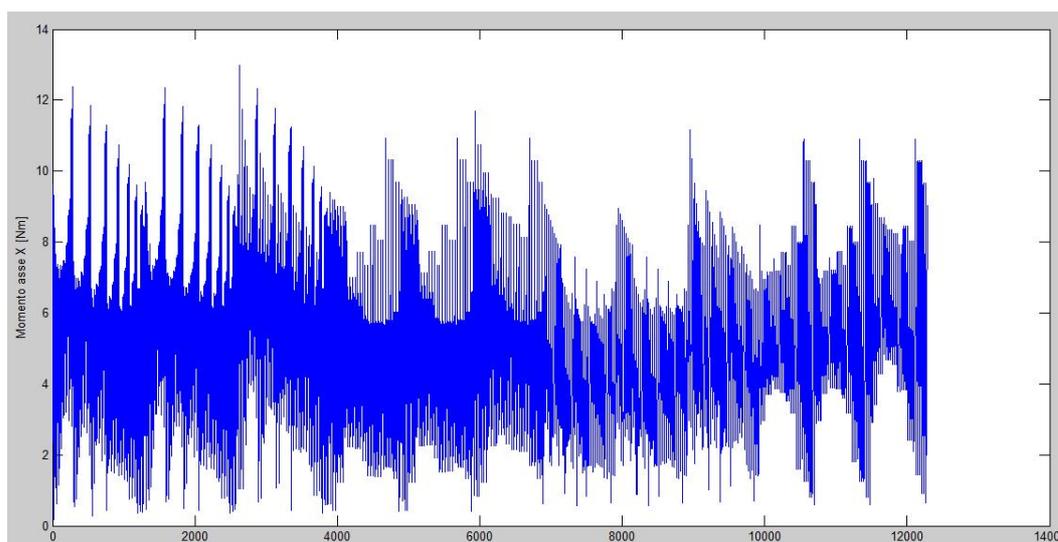
### **Massa carico: 0 Kg**

La coppia massima nell'asse x è 12,97 Nm

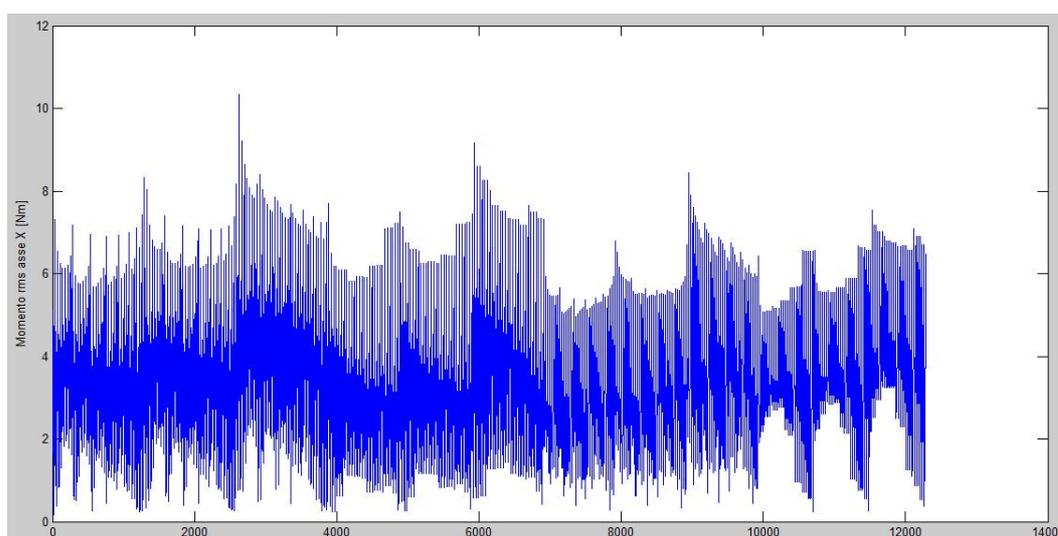
La media delle coppie rms nell'asse x è 3,37 Nm

La coppia massima nell'asse y è 29,99 Nm

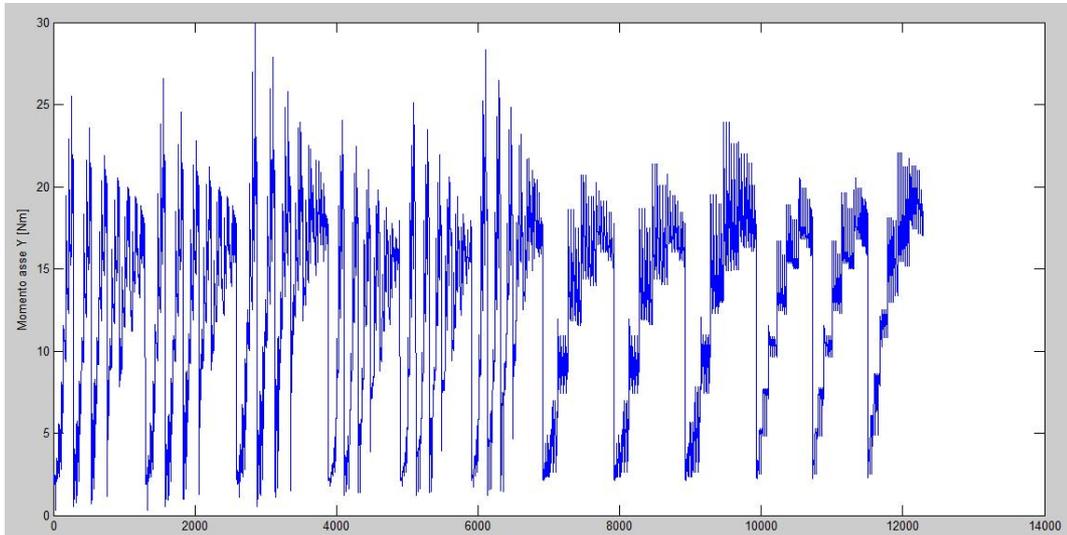
La media delle coppie rms nell'asse y è 9,32 Nm



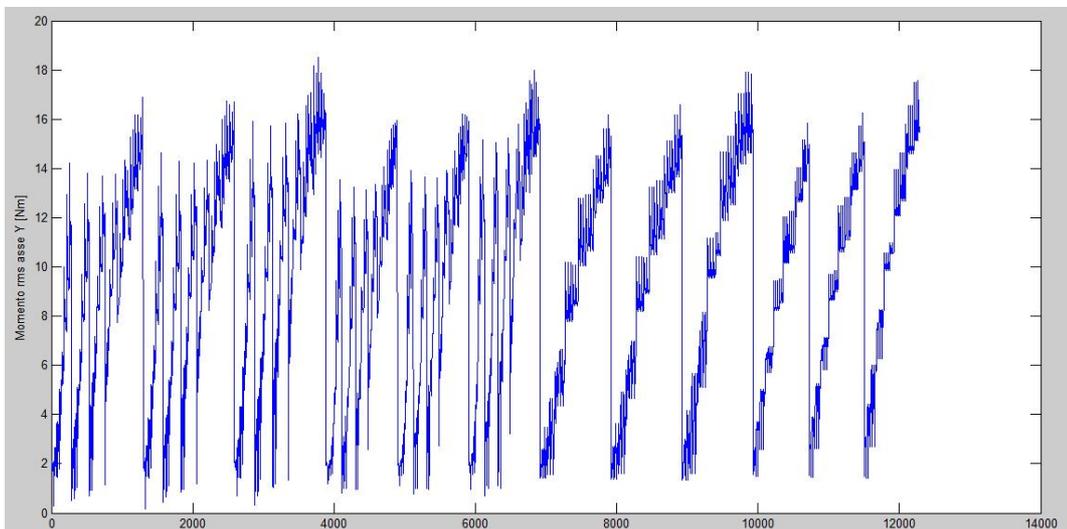
**Figura 6.2: grafico delle coppie massime richieste all'asse x per ogni combinazione di movimentazione con carico di 0 Kg.**



**Figura 6.3: grafico delle coppie rms all'asse x per ogni combinazione di movimentazione con carico di 0 Kg.**



**Figura 6.4: grafico delle coppie massime richieste all'asse y per ogni combinazione di movimentazione con carico di 0 Kg.**



**Figura 6.5: grafico delle coppie rms all'asse y per ogni combinazione di movimentazione con carico di 0 Kg.**

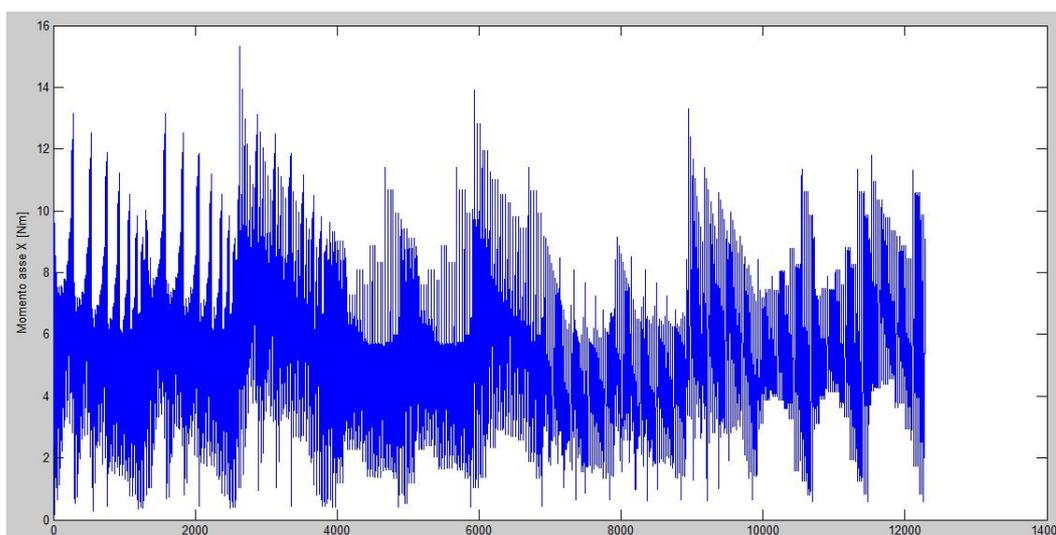
### **Massa carico: 25 Kg**

La coppia massima nell'asse x è 15,31 Nm

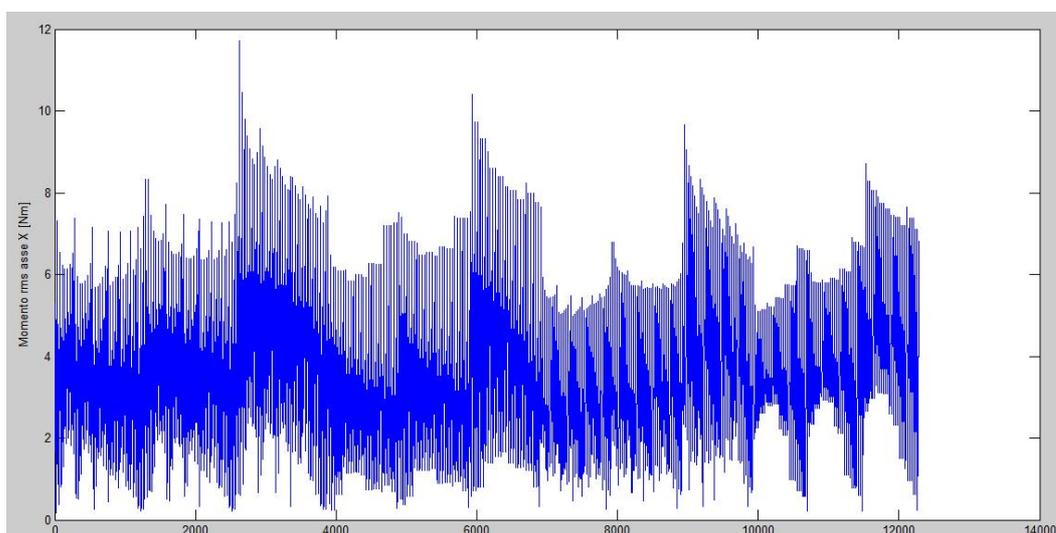
La media delle coppie rms nell'asse x è 3,48 Nm

La coppia massima nell'asse y è 33,33 Nm

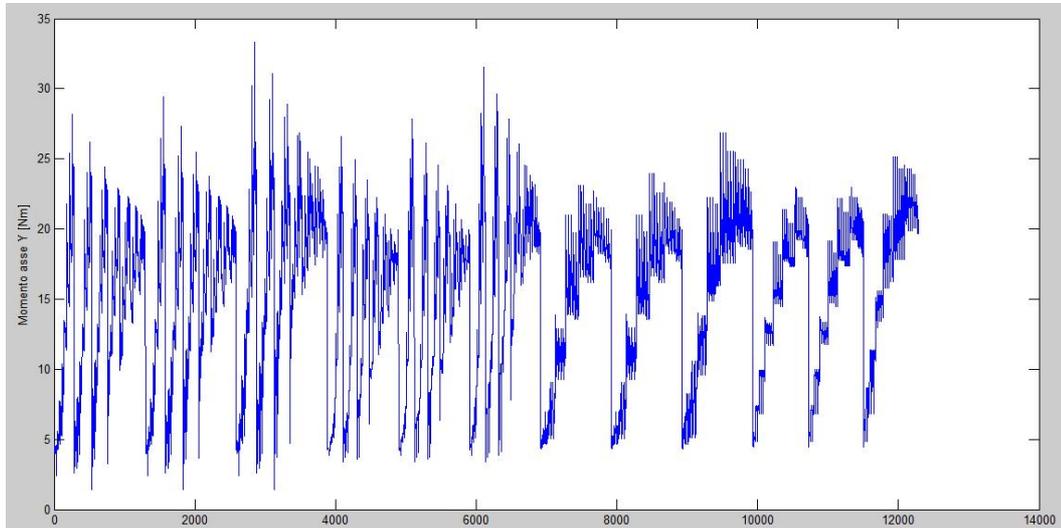
La media delle coppie rms nell'asse y è 11,38 Nm



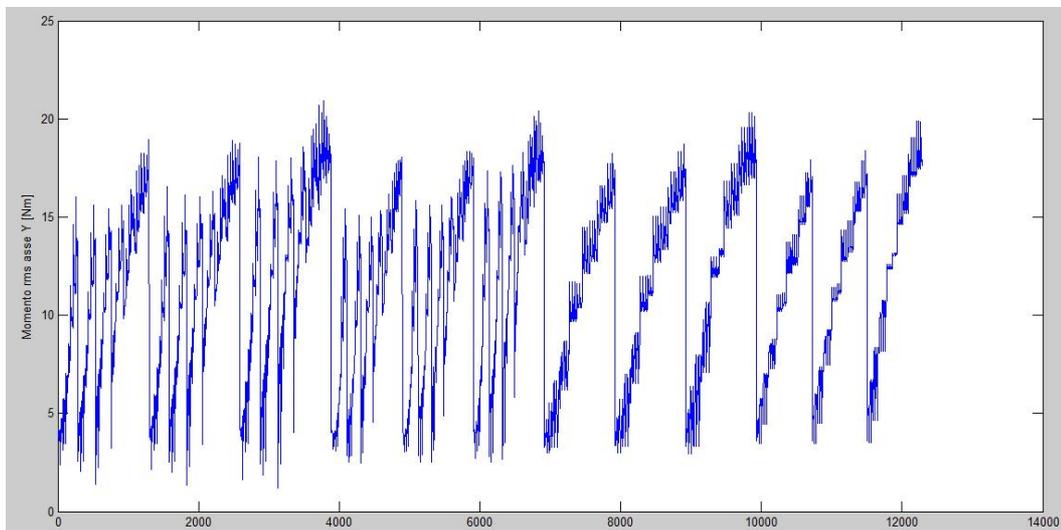
**Figura 6.6: grafico delle coppie massime richieste all'asse x per ogni combinazione di movimentazione con carico di 25 Kg.**



**Figura 6.7: grafico delle coppie rms all'asse x per ogni combinazione di movimentazione con carico di 25 Kg.**



**Figura 6.8: grafico delle coppie massime richieste all'asse y per ogni combinazione di movimentazione con carico di 25 Kg.**



**Figura 6.9: grafico delle coppie rms all'asse y per ogni combinazione di movimentazione con carico di 25 Kg.**

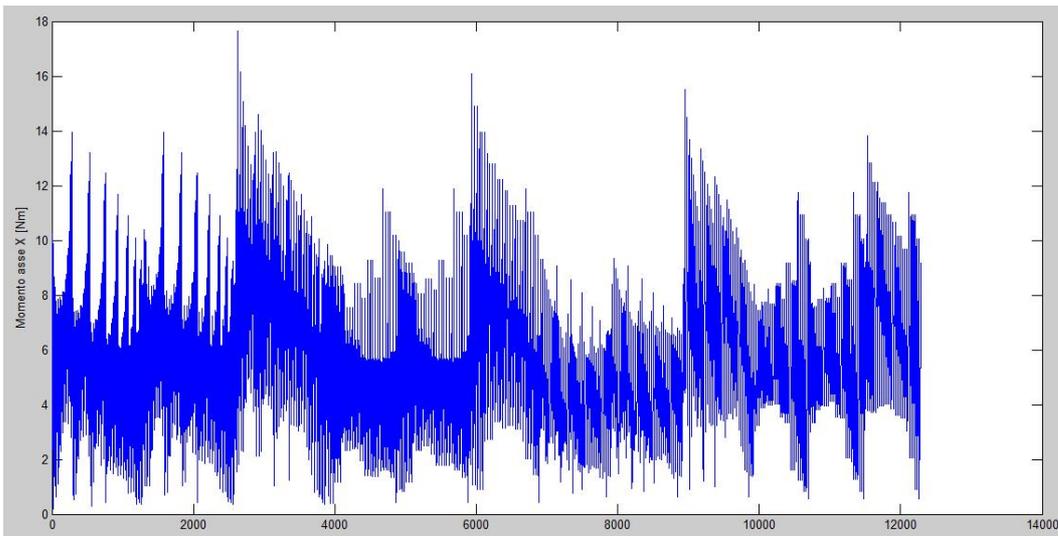
**Massa carico: 50 Kg**

La coppia massima nell'asse x è 17,66 Nm

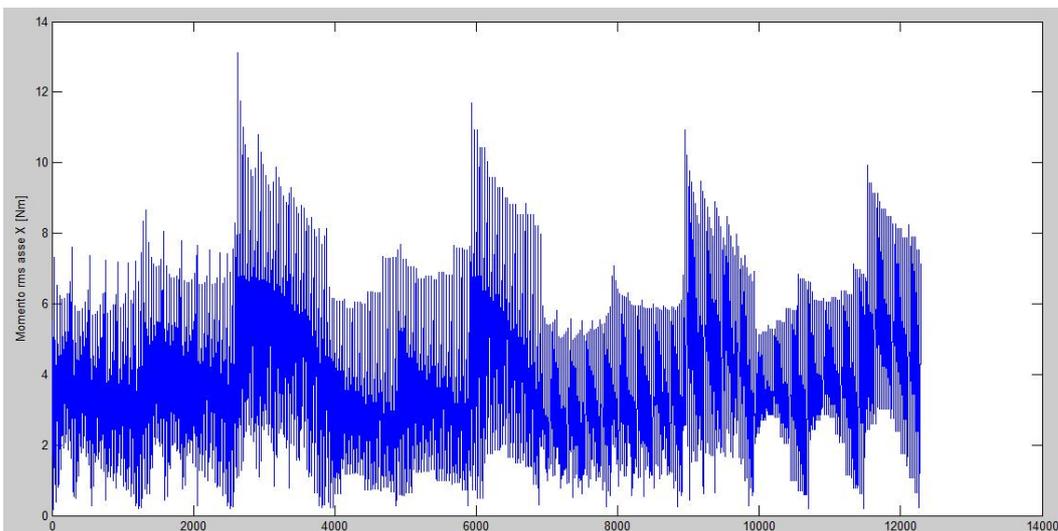
La media delle coppie rms nell'asse x è 3,70 Nm

La coppia massima nell'asse y è 36,68 Nm

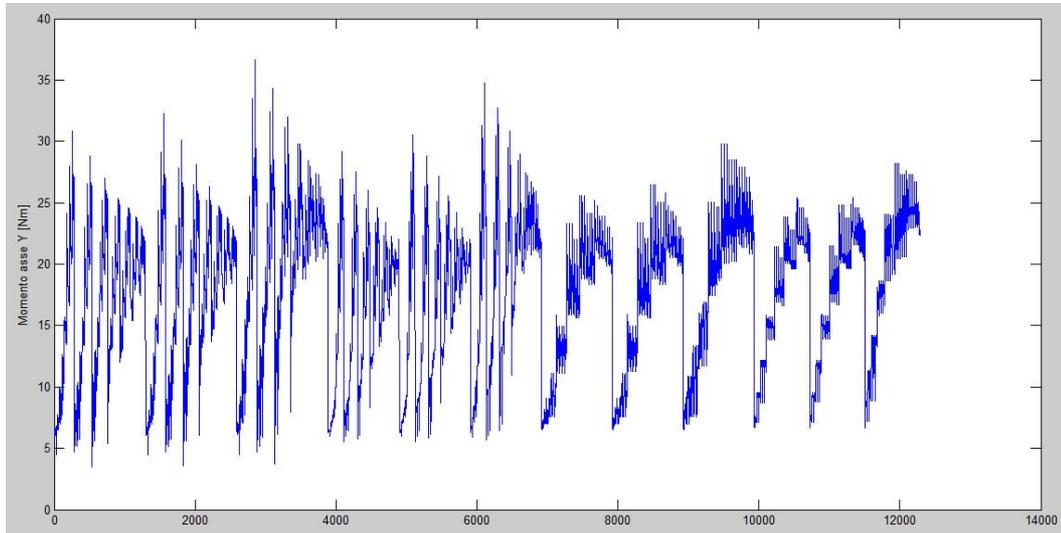
La media delle coppie rms nell'asse y è 13,60 Nm



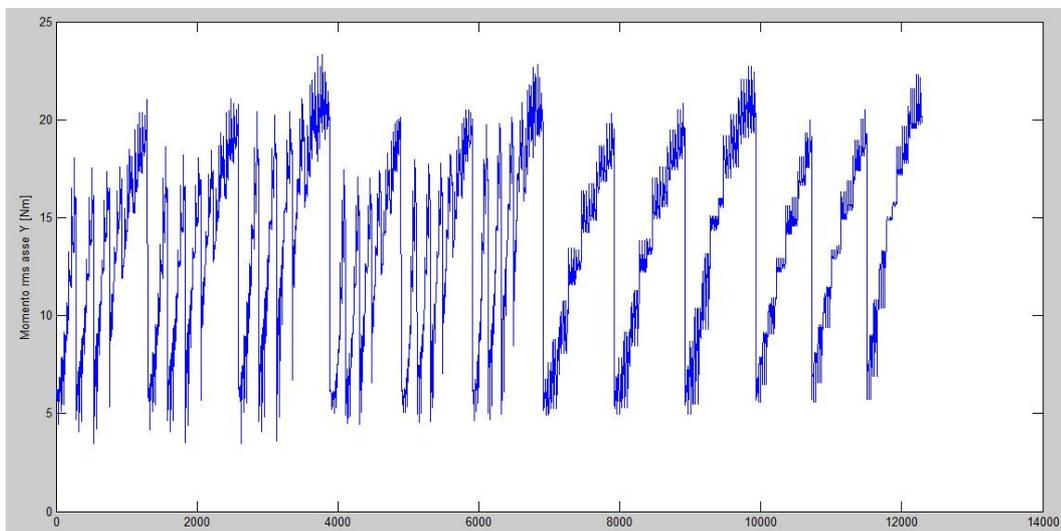
**Figura 6.10: grafico delle coppie massime richieste all'asse x per ogni combinazione di movimentazione con carico di 50 Kg.**



**Figura 6.11: grafico delle coppie rms all'asse x per ogni combinazione di movimentazione con carico di 50 Kg.**



**Figura 6.12: grafico delle coppie massime richieste all'asse y per ogni combinazione di movimentazione con carico di 50 Kg.**



**Figura 6.13: grafico delle coppie rms all'asse y per ogni combinazione di movimentazione con carico di 50 Kg.**

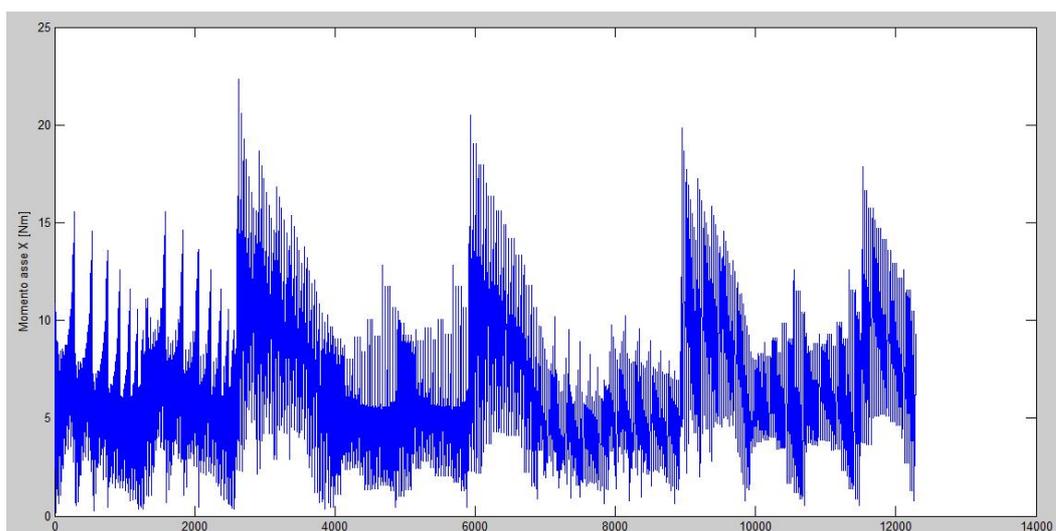
### **Massa carico: 100 Kg**

La coppia massima nell'asse x è 22,34 Nm

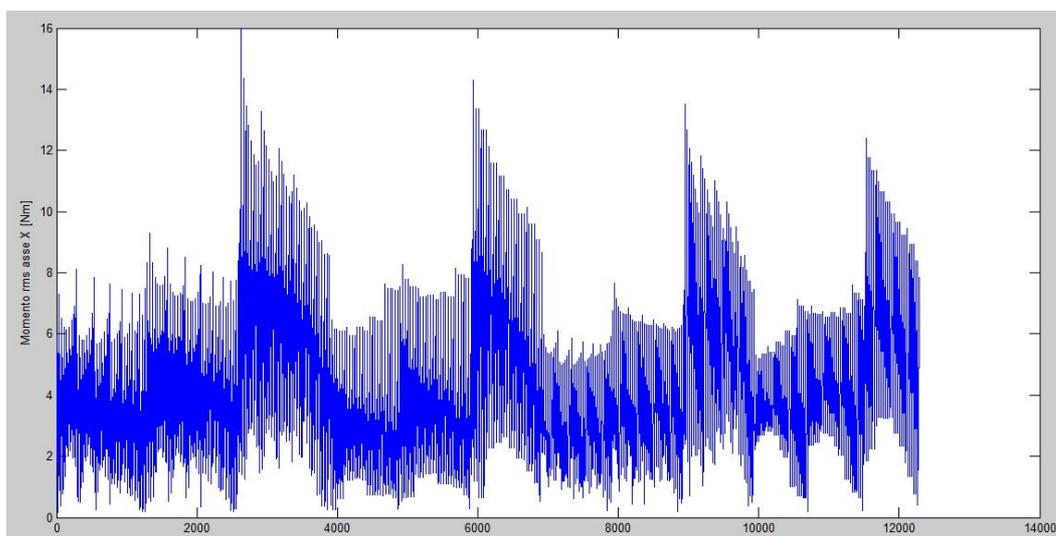
La media delle coppie rms nell'asse x è 4,20 Nm

La coppia massima nell'asse y è 43,36 Nm

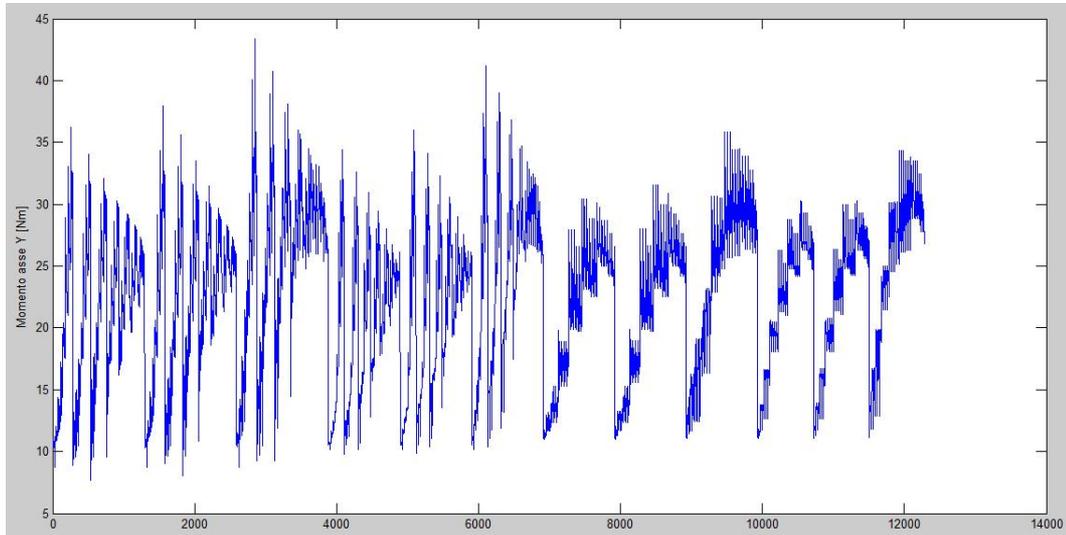
La media delle coppie rms nell'asse y è 18,13 Nm



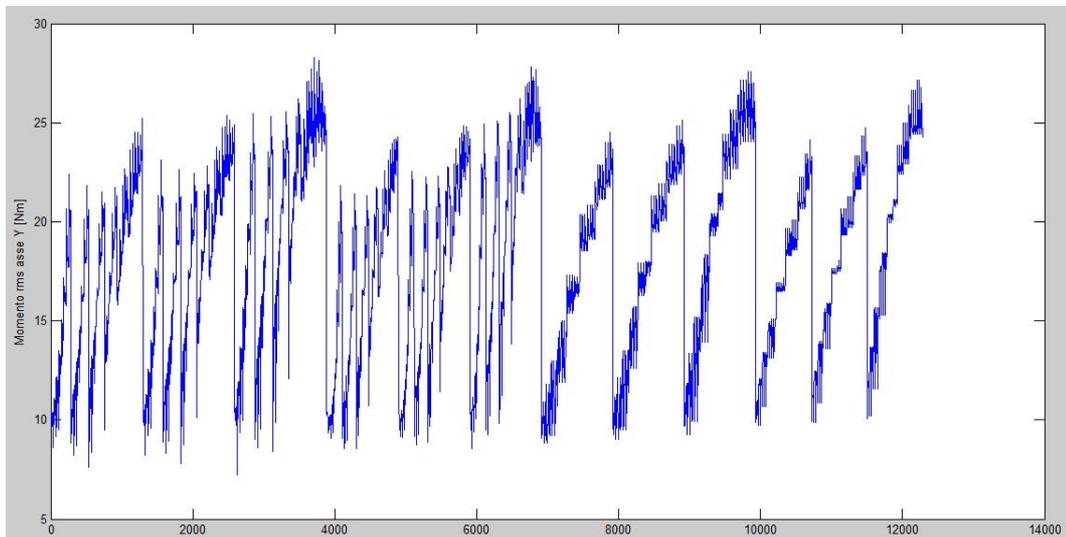
**Figura 6.14: grafico delle coppie massime richieste all'asse x per ogni combinazione di movimentazione con carico di 100 Kg.**



**Figura 6.15: grafico delle coppie rms all'asse x per ogni combinazione di movimentazione con carico di 100 Kg.**



**Figura 6.16: grafico delle coppie massime richieste all'asse y per ogni combinazione di movimentazione con carico di 100 Kg.**



**Figura 6.17: grafico delle coppie rms all'asse y per ogni combinazione di movimentazione con carico di 100 Kg.**

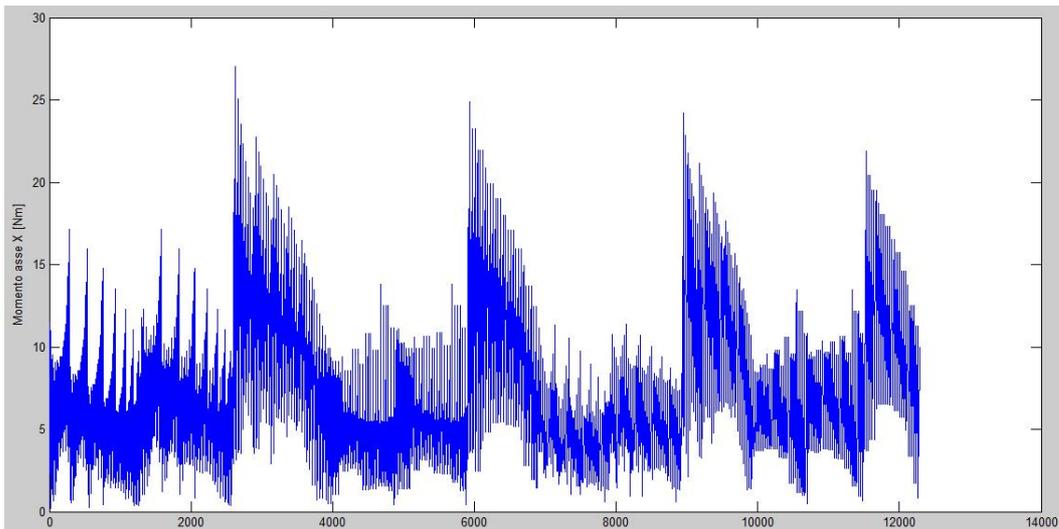
**Massa carico: 150 Kg**

La coppia massima nell'asse x è 27,02 Nm

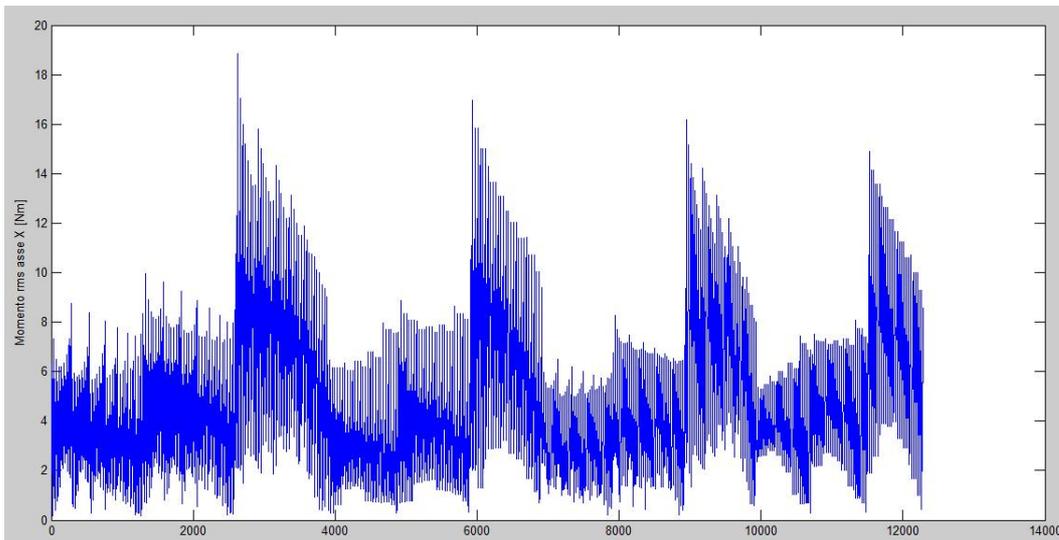
La media delle coppie rms nell'asse x è 4,73 Nm

La coppia massima nell'asse y è 50,05 Nm

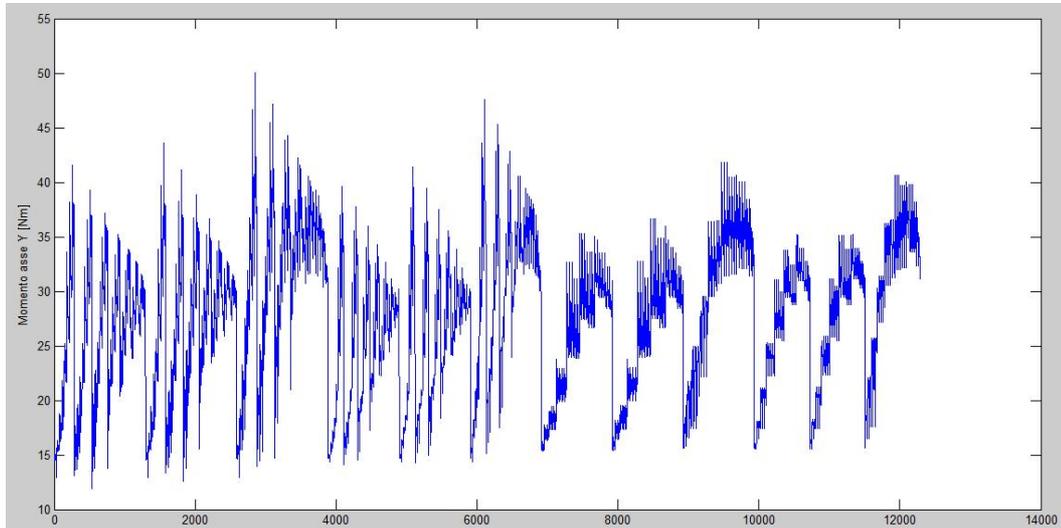
La media delle coppie rms nell'asse y è 22,72 Nm



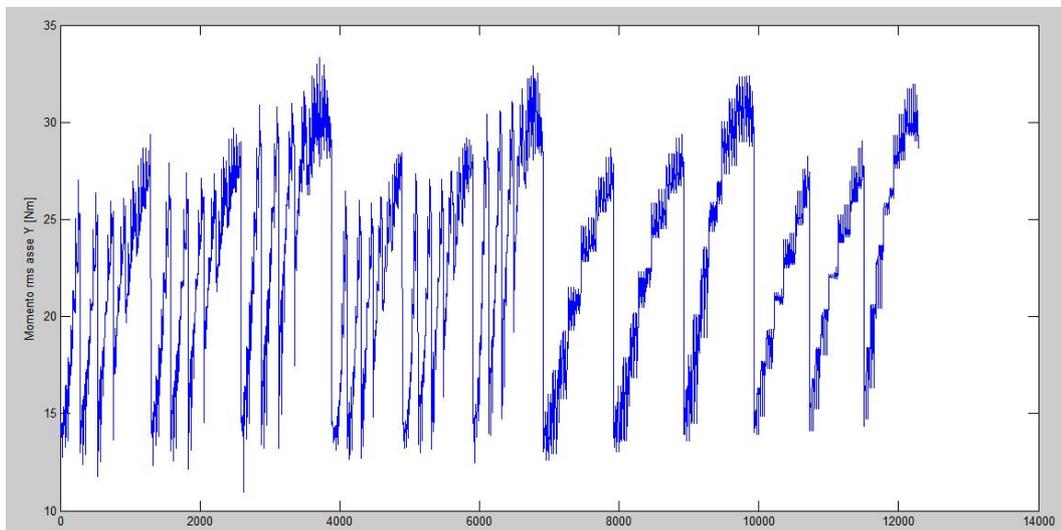
**Figura 6.18: grafico delle coppie massime richieste all'asse x per ogni combinazione di movimentazione con carico di 150 Kg.**



**Figura 6.19: grafico delle coppie rms all'asse x per ogni combinazione di movimentazione con carico di 150 Kg.**



**Figura 6.20: grafico delle coppie massime richieste all'asse y per ogni combinazione di movimentazione con carico di 150 Kg.**



**Figura 6.21: grafico delle coppie rms all'asse y per ogni combinazione di movimentazione con carico di 150 Kg.**

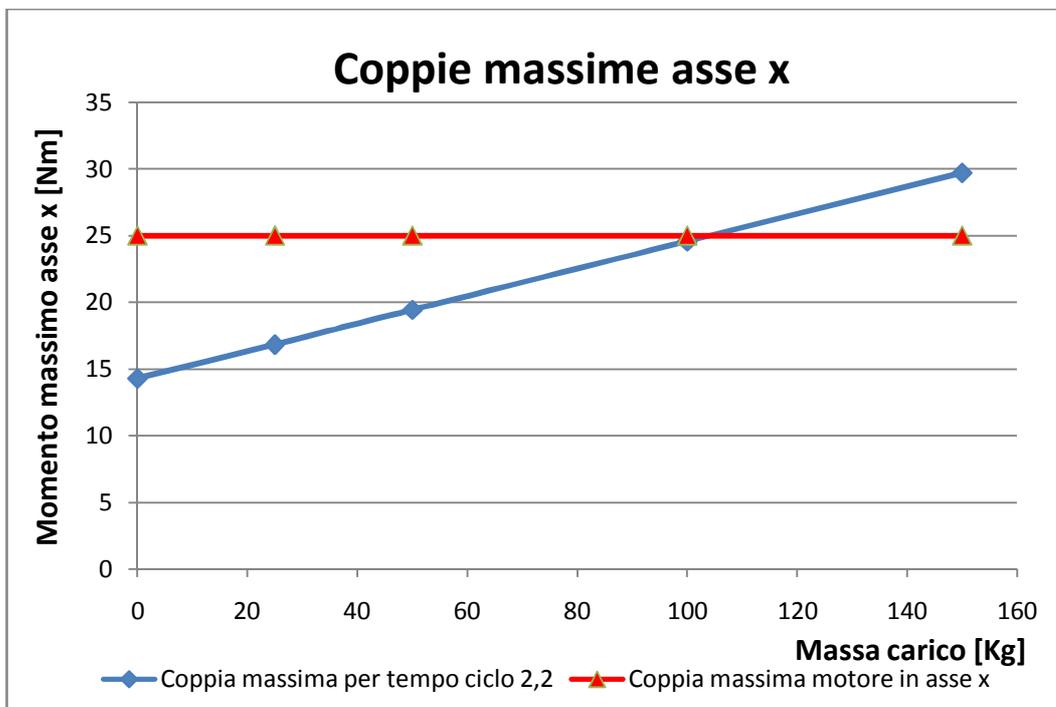
Notare come in tutti i casi le velocità angolari massime e le velocità angolari rms medie non varino in quanto il tempo ciclo è stato mantenuto costante a 2,2 secondi:

- La velocità angolare massima nell'asse x è 2418 giri/minuto
- La media delle velocità angolare rms nell'asse x è 638 giri/minuto
- La velocità angolare massima nell'asse y è 2384 giri/minuto
- La media delle velocità angolare rms nell'asse y è 629 giri/minuto

Il modello matematico su cui si basano questi valori non tiene conto degli attriti nei giunti rotoidali. Per questo nella tabella 6.2 le coppie sono state tutte maggiorate del 10%, valore tipicamente utilizzato all'interno dell'azienda.

	0 Kg	25 Kg	50 Kg	100 Kg	150 Kg
Coppia asse x	14,27	16,83	19,43	24,57	29,72
Coppia rms asse x	3,71	3,83	4,1	4,6	5,2
Coppia asse y	32,99	36,66	40,35	47,7	55,1
Coppia rms asse y	10,25	12,52	14,96	19,94	24,99

**Tabella 6.2:** tabella riepilogativa delle coppie massime e delle medie delle coppie rms.



**Figura 6.22:** grafico delle coppie massime all'asse x.

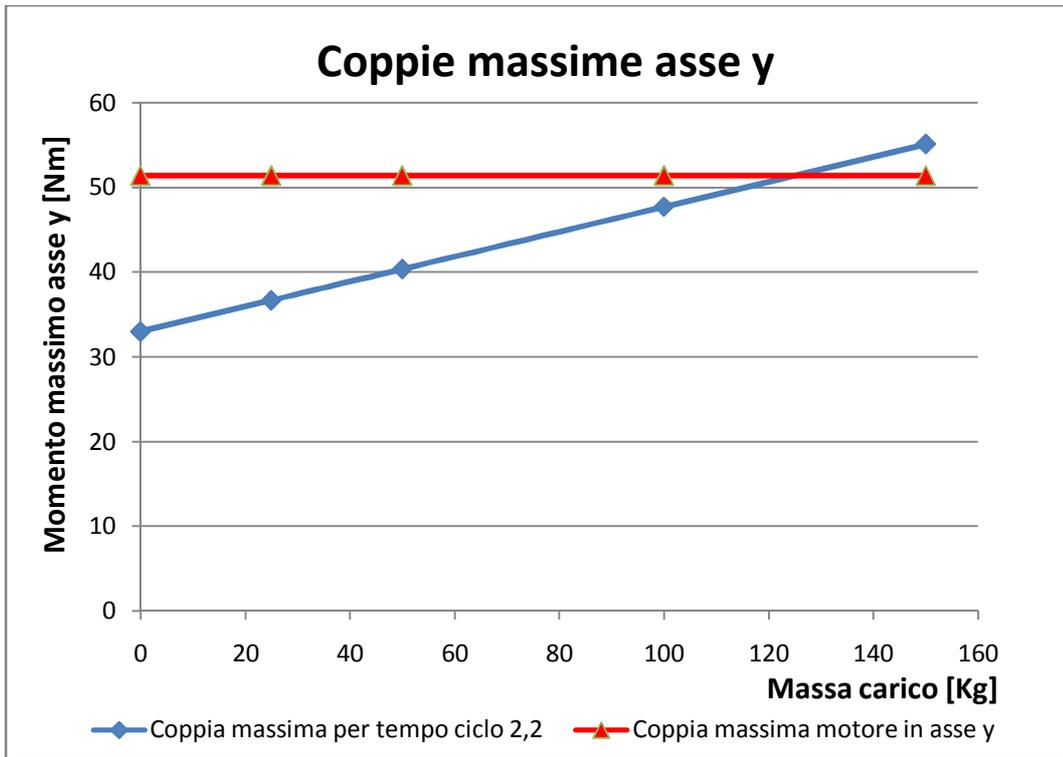


Figura 6.23: grafico delle coppie massime all'asse y.

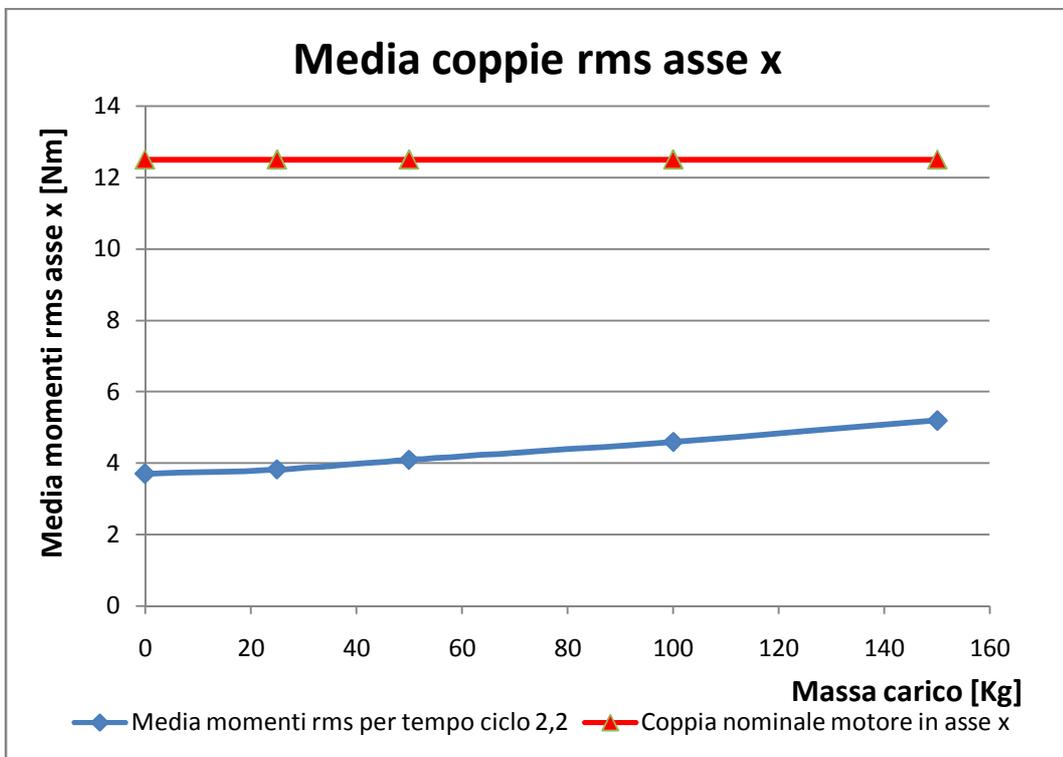


Figura 6.24: grafico delle medie delle coppie rms all'asse x.

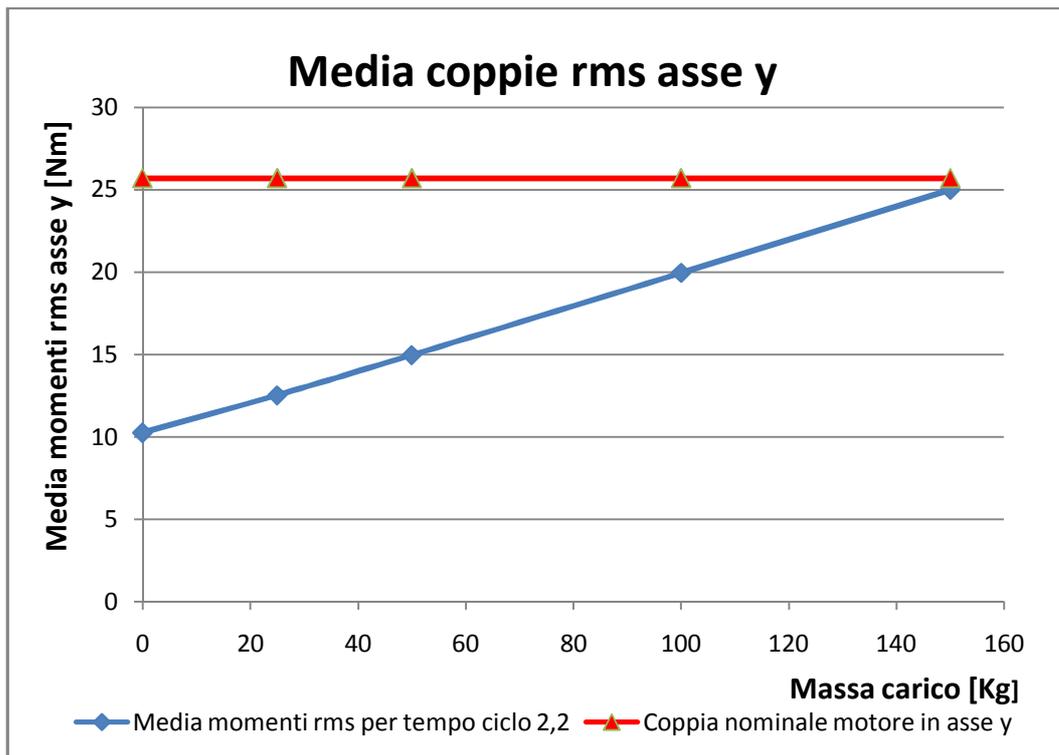


Figura 6.25: grafico delle medie delle coppie rms all'asse y.

In linea generale si può constatare che la richiesta di coppia aumenta proporzionalmente con l'aumentare del carico.

## 6.2 Mappatura relativa alla rotazione della torretta

### 6.2.1 Impostazione generale

La mappatura riferita alla rotazione della torretta ha come scopo principale quello di verificare l'azionamento elettrico installato per effettuare la movimentazione stessa. A differenza della precedente mappatura, i moventi x e y vengono combinati tra loro solo in posizioni fisse durante la rotazione dell'intero robot. Analogamente a prima, invece, vengono definiti:

$n_x$  = numero di punti raggiungibili dal movente x

$n_y$  = numero di punti raggiungibili dal movente y

e

$$\Delta Z_1 = \frac{Z_{1\_max}}{n_y - 1}$$

$$\Delta Z_2 = \frac{Z_{2\_max}}{n_x - 1}$$

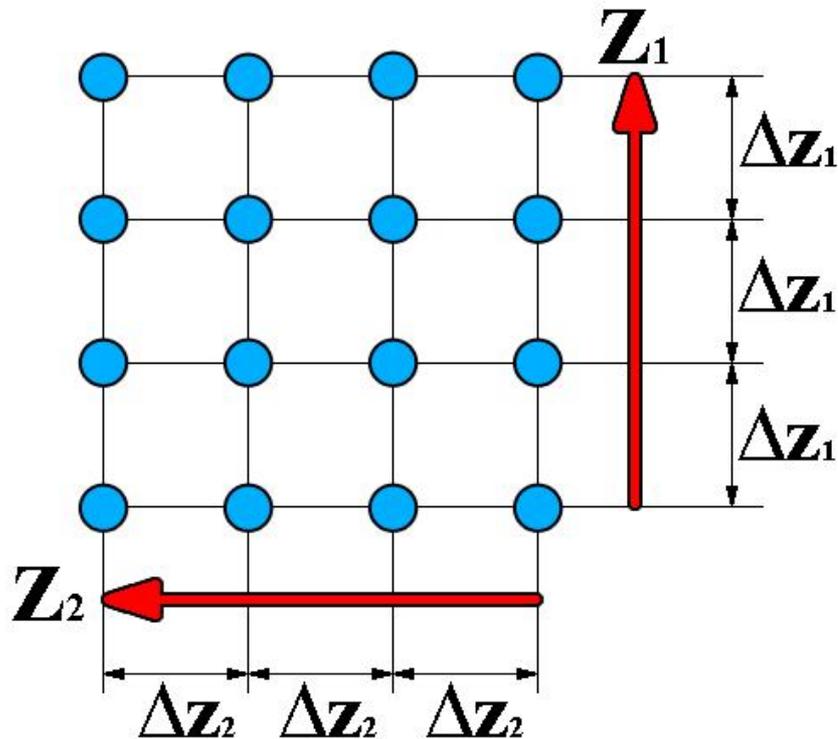


Figura 6.26: esempio delle posizioni che assumono i moventi orizzontale e verticale.

Questa mappatura viene effettuata con un'unica rotazione, da  $0^\circ$  a  $180^\circ$ . Per ogni combinazione vengono salvati la coppia motrice massima, la coppia motrice rms, la velocità angolare massima e la velocità angolare rms. Dopo aver effettuato tutte le combinazioni, delle coppie motrici massime e delle velocità angolari massime vengono presi i valori massimi, delle coppie motrici rms e delle velocità angolari rms se ne fa una media.

In questo caso il numero di combinazioni totali è da calcolare con la seguente formula:

$$N_{tot} = n_x * n_y \tag{6.8}$$

## 6.2.2 Raccolta dati della mappatura relativa alla rotazione della torretta

La raccolta dati è stata effettuata impostando questi valori:

- Numero di campionamento = 50
- Tempo ciclo = 2,2 secondi
- $n_x = 25$
- $n_y = 25$

Sono stati valutati cinque carichi differenti: pinza vuota, 25 Kg, 50 Kg, 100 Kg, 150 Kg. Come prima, questi valori si riferiscono al carico da trasportare ed è esclusa la massa della pinza.

Il numero di combinazioni totali è:

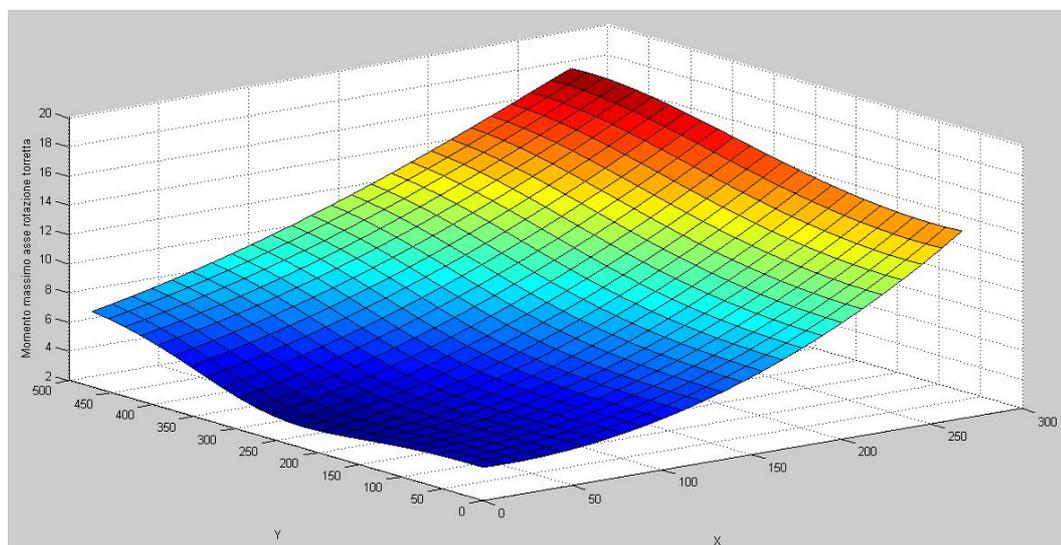
$$N_{tot} = n_x * n_y = 25 * 25 = 625 \text{ combinazioni} \quad (6.9)$$

Rispetto alle 12288 combinazioni della mappatura precedente, è evidente che il costo computazione richiesto da questo codice è nettamente inferiore.

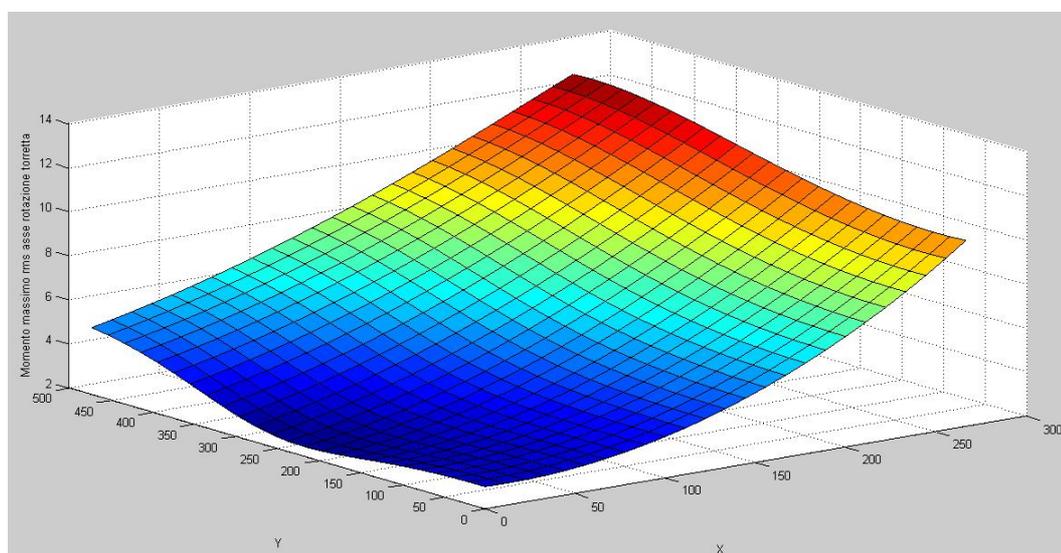
**Massa carico: 0 Kg**

La coppia massima è 18,20 Nm

La media delle coppie rms è 6,51 Nm



**Figura 6.27: grafico delle coppie massime all'asse di rotazione della torretta con carico di 0 Kg.**

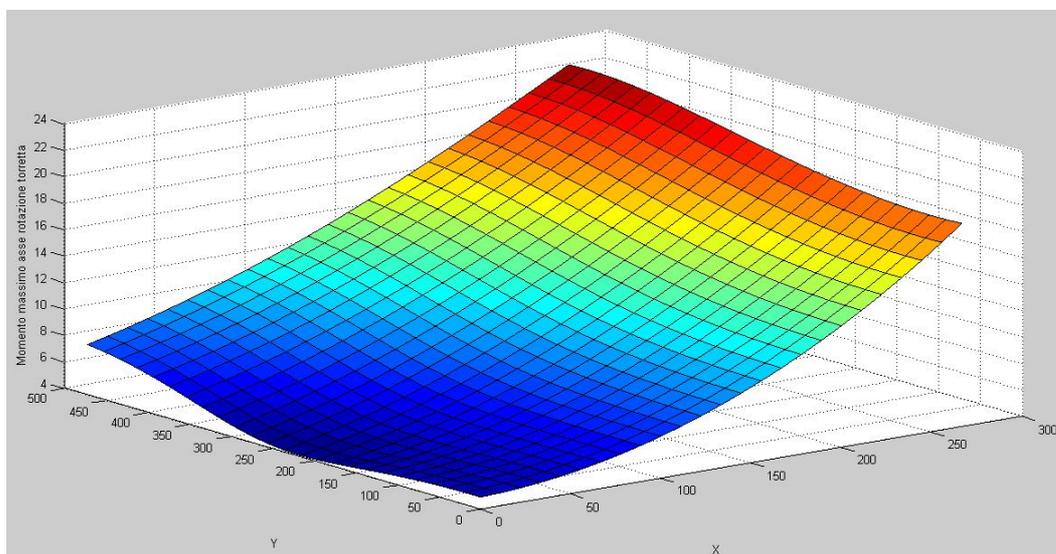


**Figura 6.28: grafico delle coppie rms all'asse di rotazione della torretta con carico di 0 Kg.**

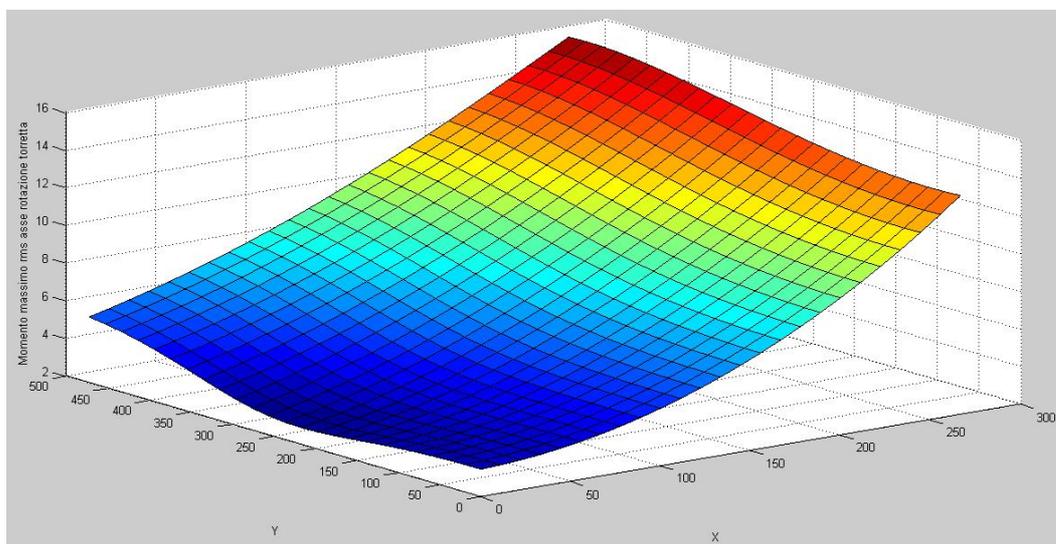
**Massa carico: 25 Kg**

La coppia massima è 22,70 Nm

La media delle coppie rms è 8,11 Nm



**Figura 6.29: grafico delle coppie massime all'asse di rotazione della torretta con carico di 25 Kg.**

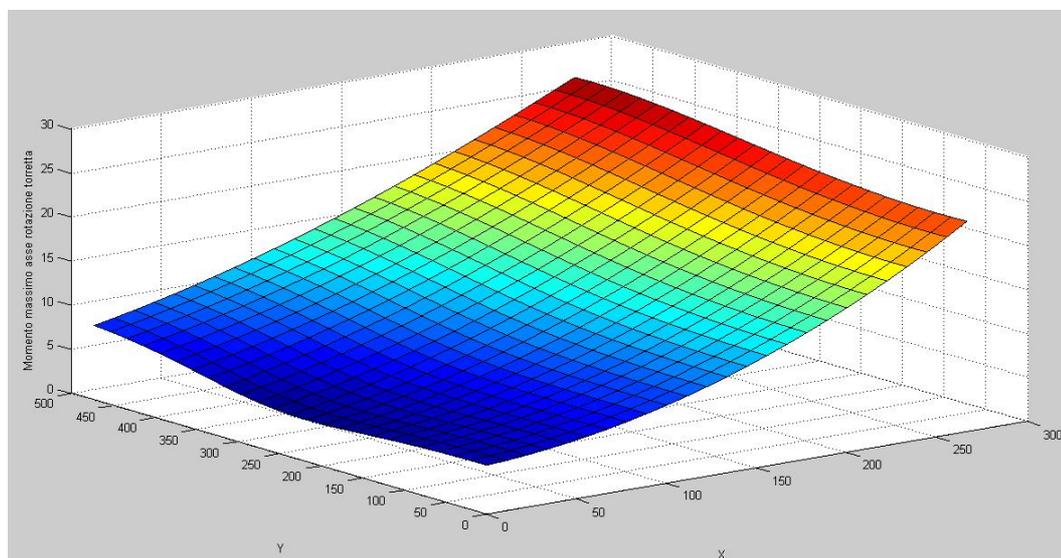


**Figura 6.30: grafico delle coppie rms all'asse di rotazione della torretta con carico di 25 Kg.**

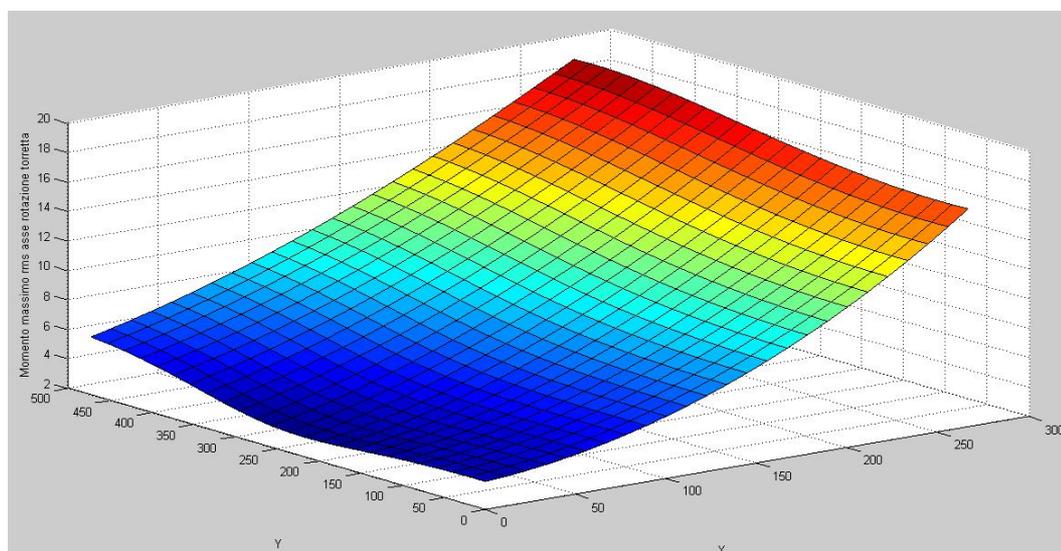
**Massa carico: 50 Kg**

La coppia massima è 27,21 Nm

La media delle coppie rms è 9,72 Nm



**Figura 6.31: grafico delle coppie massime all'asse di rotazione della torretta con carico di 50 Kg.**

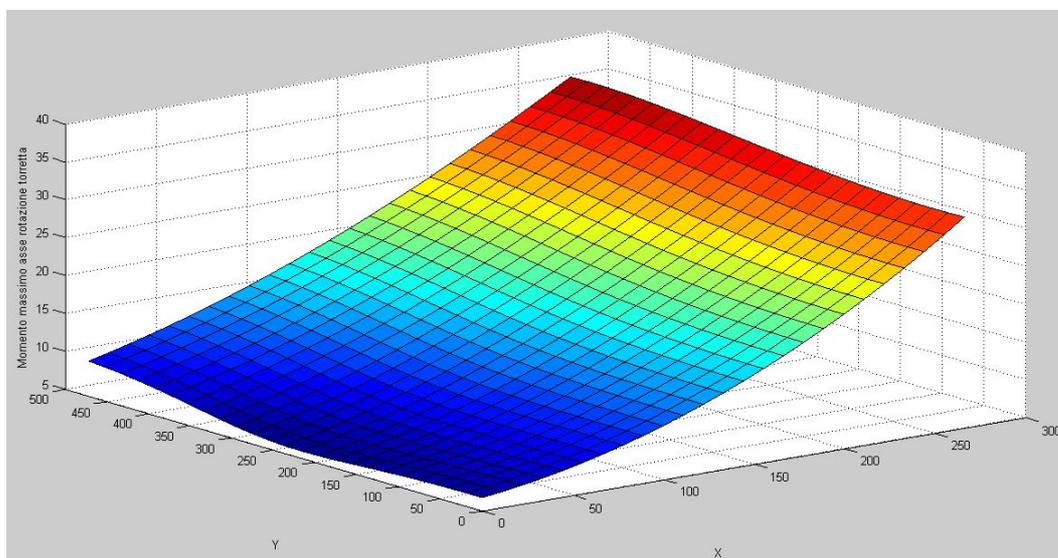


**Figura 6.32: grafico delle coppie rms all'asse di rotazione della torretta con carico di 50 Kg.**

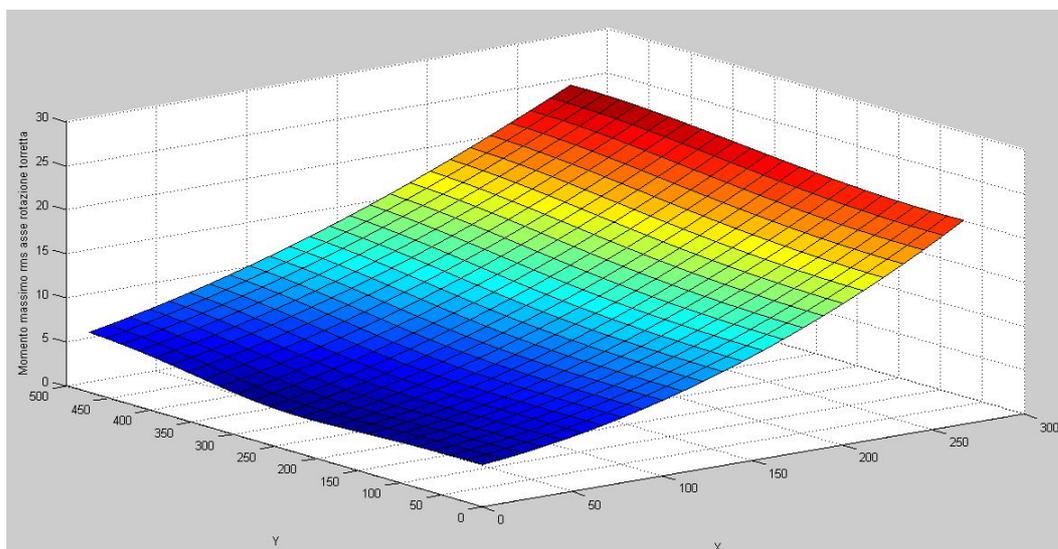
**Massa carico: 100 Kg**

La coppia massima è 36,23 Nm

La media delle coppie rms è 12,93 Nm



**Figura 6.33: grafico delle coppie massime all'asse di rotazione della torretta con carico di 100 Kg.**

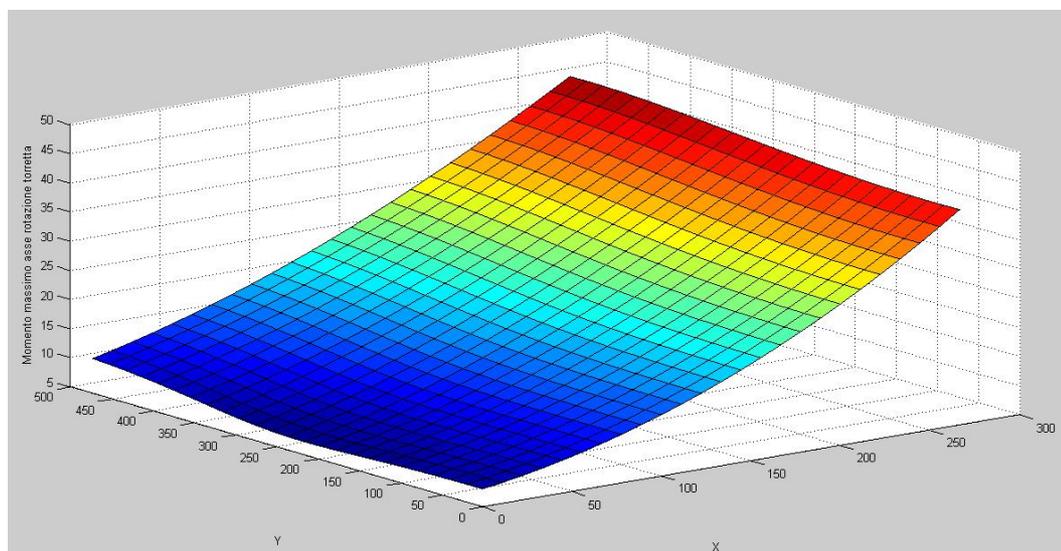


**Figura 6.34: grafico delle coppie rms all'asse di rotazione della torretta con carico di 100 Kg.**

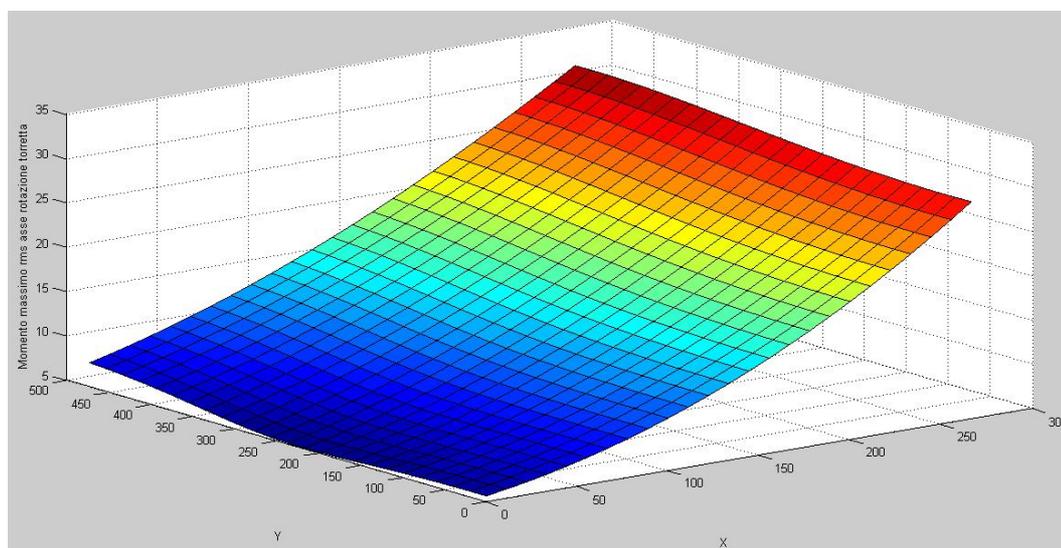
**Massa carico: 150 Kg**

La coppia massima è 45,24 Nm

La media delle coppie rms è 16,15 Nm



**Figura 6.35: grafico delle coppie massime all'asse di rotazione della torretta con carico di 150 Kg.**



**Figura 6.36: grafico delle coppie rms all'asse di rotazione della torretta con carico di 150 Kg.**

In questo caso non vengono maggiorati del 10% i valori delle coppie perché gli unici attriti sono quelli dovuti alla trasmissione di cui si è già tenuto conto con i valori di rendimento.

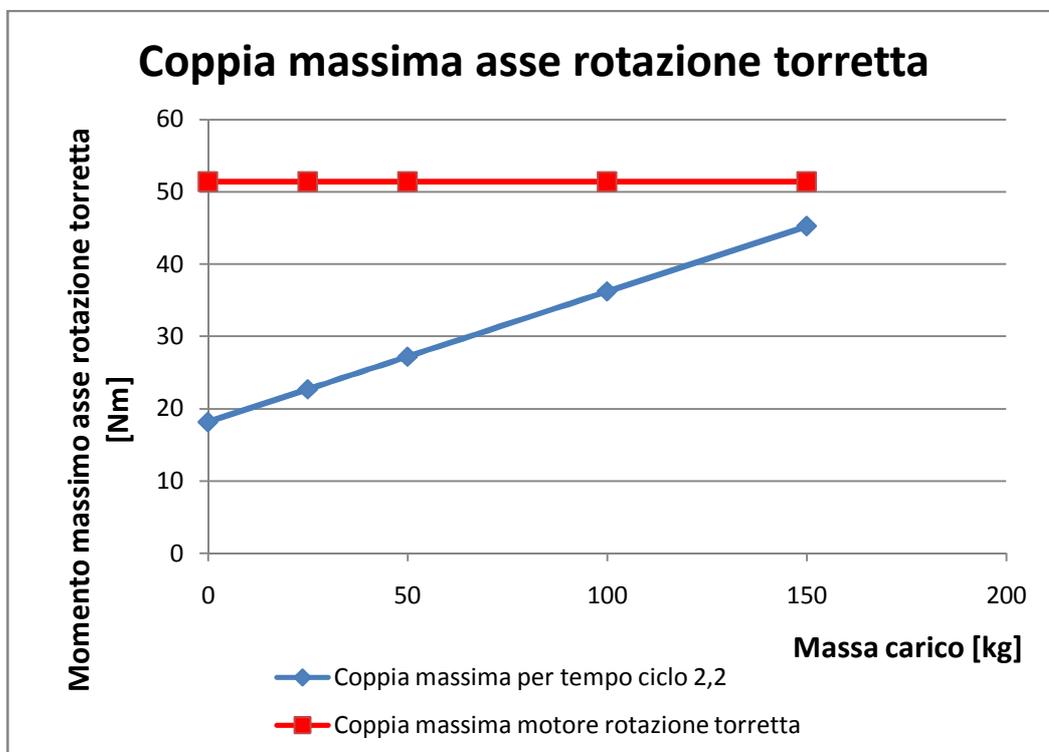
	0 Kg	25 Kg	50 Kg	100 Kg	150 Kg
Coppia asse	18,20	22,7	27,21	36,23	45,24
Coppia rms asse	6,51	8,11	9,72	12,93	16,15

**Tabella 6.3: tabella riepilogativa delle coppie massime e delle medie delle coppie rms.**

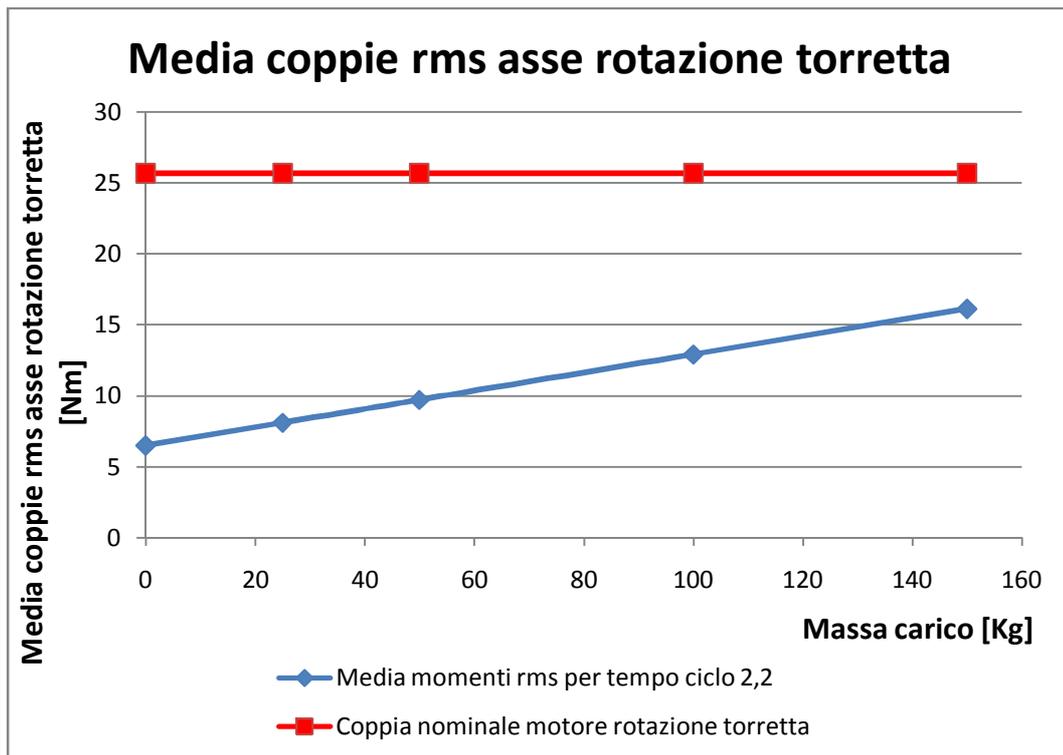
Come si può osservare dai grafici soprastanti la coppia massima richiesta aumenta proporzionalmente all'aumentare dello sbraccio.

Notare come in tutti i casi le velocità angolari massime e le velocità angolari rms medie non varino in quanto il tempo ciclo è stato mantenuto costante a 2,2 secondi:

- La velocità angolare massima nell'asse è 2864 giri/minuto
- La media delle velocità angolare rms nell'asse è 2014 giri/minuto



**Figura 6.37: grafico delle coppie massime all'asse di rotazione della torretta.**



**Figura 6.38: grafico delle medie delle coppie rms all'asse di rotazione della torretta.**

In linea generale si può constatare che la richiesta di coppia aumenta proporzionalmente con l'aumentare del carico.

### 6.3 Analisi dati

Il modello matematico realizzato porta alle seguenti considerazioni rispetto alla scelta degli azionamenti elettrici effettuata dall'azienda Paglierani:

- L'azionamento adibito alla movimentazione orizzontale può presentare una coppia non sufficiente per carichi superiori ai 100 Kg. Per quel che riguarda la velocità angolare e la coppia rms, l'azionamento elettrico riesce a soddisfare la richiesta.
- L'azionamento adibito alla movimentazione verticale può presentare una coppia non sufficiente per carichi superiori ai 120 Kg. Per quel che riguarda la velocità angolare e la coppia rms, l'azionamento elettrico riesce a soddisfare la richiesta.

- L'azionamento adibito alla rotazione della torretta riesce a soddisfare in modo completo sia le richieste di coppia massima, sia di coppia rms, che di velocità angolare massima.

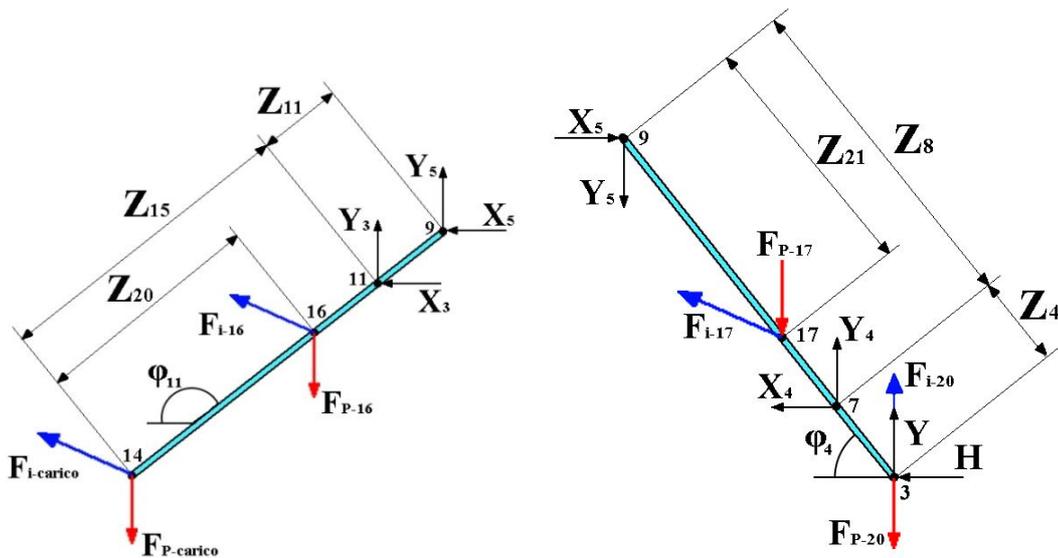
Preme ricordare che i quadratici medi di coppia e velocità angolare sono delle medie tra tutte le combinazioni effettuate. Si consiglia quindi di valutare caso per caso gli effettivi valori per non incorrere in indesiderati surriscaldamenti degli azionamenti.

# Capitolo 7

## ANALISI DELLE SOLLECITAZIONI

### 7.1 Formulazione analitica degli sollecitazioni

In questo capitolo è proposta la formulazione analitica delle sollecitazioni di sforzo normale, taglio e momento flettente che si generano nei membri A,B,C e D durante una generica movimentazione nel piano (X,Y) e rotazione della torretta. Specifico che la seguente trattazione non si prefigge di essere esaustiva, ma solo indicativa, in quanto dovrebbe essere completata da uno studio a fatica e da una analisi elastodinamica attraverso un software commerciale. Ritengo comunque importante esporre questa parte perché può dare una ottima indicazione degli ordini di grandezza delle sollecitazioni che le leve devono sostenere. La formulazione si appoggia sull'analisi cinetostatica e qui di seguito riporto gli schemi generali delle azioni motrici e reazioni interne a cui sono impiegati i membri.



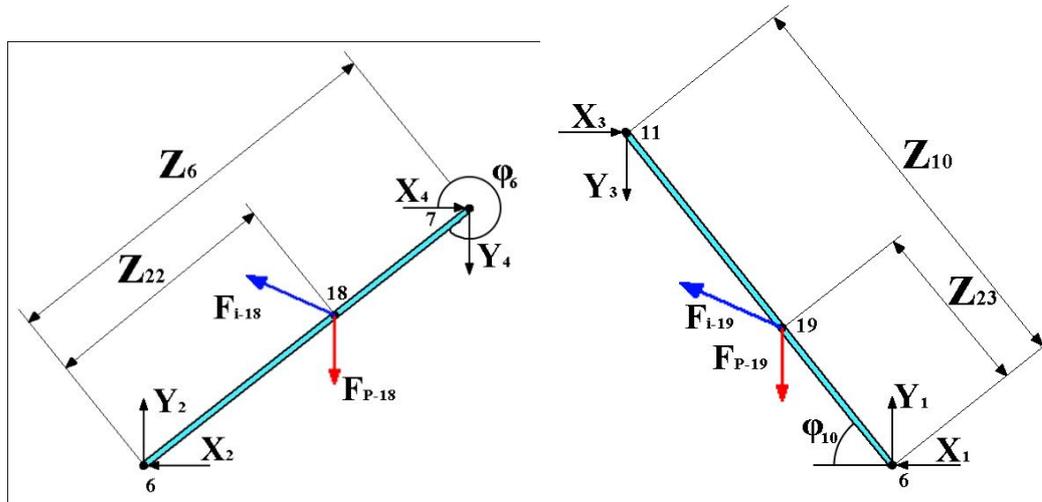


Figura 7.1: a sinistra in alto, il membro A; a destra in alto, il membro B; a sinistra in basso, il membro C; a destra in basso il membro D.

### Membro A

#### Tratto 14-16:

- Sforzo normale

$$N_{14_16} = (-M_{carico} * \overrightarrow{acc_{14-x}} * \cos(\pi - \varphi_9)) - (M_{carico} * (g - \overrightarrow{acc_{14-y}}) * \cos(\varphi_9 - \frac{\pi}{2})) \quad (7.1)$$

- Taglio

$$T_{14_16} = (-M_{carico} * \overrightarrow{acc_{14-x}} * \sin(\pi - \varphi_9)) + (M_{carico} * (g - \overrightarrow{acc_{14-y}}) * \sin(\varphi_9 - \frac{\pi}{2})) \quad (7.2)$$

- Momento flettente

$$M_{f_{16}} = T_{14_16} * Z_{20} \quad (7.3)$$

#### Tratto 16-11:

- Sforzo normale

$$N_{16_11} = N_{14_16} + (-M_A * \overrightarrow{acc_{16-x}} * \cos(\pi - \varphi_9)) - (M_A * (g - \overrightarrow{acc_{15-y}}) * \cos(\varphi_9 - \frac{\pi}{2})) \quad (7.4)$$

- Taglio

$$T_{16_11} = T_{14_16} + (-M_A * \overrightarrow{acc_{16-x}} * \sin(\pi - \varphi_9)) + (M_A * (g - \overrightarrow{acc_{16-y}}) * \sin(\varphi_9 - \frac{\pi}{2})) \quad (7.5)$$

Tratto 11-9:

- Sforzo normale

$$N_{11_9} = N_{16_11} + (X_3 * \cos(\pi - \varphi_9)) - (Y_3 * \cos(\varphi_9 - \frac{\pi}{2})) \quad (7.6)$$

- Taglio

$$T_{11_9} = T_{16_11} + (X_3 * \sin(\pi - \varphi_9)) + (Y_3 * \sin(\varphi_9 - \frac{\pi}{2})) \quad (7.7)$$

- Momento flettente

$$M_{f\ 11} = T_{11_9} * Z_{11} \quad (7.8)$$

## **Membro B**

Tratto 9-17:

- Sforzo normale

$$N_{9_17} = (-X_5 * \cos(\varphi_4)) + (-Y_5 * \cos(\frac{\pi}{2} - \varphi_9)) \quad (7.9)$$

- Taglio

$$T_{9_17} = (-X_5 * \sin(\varphi_4)) + (-Y_5 * \sin(\frac{\pi}{2} - \varphi_9)) \quad (7.10)$$

- Momento flettente

$$M_{f\ 17} = T_{9_17} * Z_{21} \quad (7.11)$$

Tratto 17-7:

- Sforzo normale

$$N_{17_7} = N_{9_17} + (-M_B * \overrightarrow{acc_{17-x}} * \cos(\varphi_4)) + (M_B * (g - \overrightarrow{acc_{17-y}}) * \cos(\frac{\pi}{2} - \varphi_4)) \quad (7.12)$$

- Taglio

$$T_{9_17} = T_{9_17} + (-M_B * \overrightarrow{acc_{17-x}} * \sin(\varphi_4)) - (M_B * (g - \overrightarrow{acc_{17-y}}) * \sin(\frac{\pi}{2} - \varphi_4)) \quad (7.13)$$

Tratto 7-3:

- Sforzo normale

$$N_{7\_3} = (-X_5 * \cos(\varphi_4)) + (-Y_5 * \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi_4\right)) \quad (7.14)$$

- Taglio

$$T_{3\_7} = (-H * \sin(\varphi_4)) - \left(-Y * \sin\left(\frac{\pi}{2} - \varphi_4\right)\right) - (M_E * (g - \overrightarrow{acc_{3-y}}) * \sin\left(\frac{\pi}{2} - \varphi_4\right)) \quad (7.15)$$

- Momento flettente

$$M_{f\ 7} = T_{3\_7} * Z_4 \quad (7.16)$$

**Membro C**

Tratto 7-18:

- Sforzo normale

$$N_{7\_18} = (-X_4 * \cos(2\pi - \varphi_6)) + (-Y_4 * \sin(2\pi - \varphi_6)) \quad (7.17)$$

- Taglio

$$T_{7\_18} = (-X_4 * \sin(2\pi - \varphi_6)) + (-Y_4 * \cos(2\pi - \varphi_6)) \quad (7.18)$$

Tratto 18-6:

- Sforzo normale

$$N_{18\_6} = N_{7\_18} + (-M_C * \overrightarrow{acc_{18-x}} * \sin(2\pi - \varphi_6)) + (M_C * (g - \overrightarrow{acc_{18-y}}) * \cos(2\pi - \varphi_6)) \quad (7.19)$$

- Taglio

$$T_{18\_6} = T_{7\_18} + (-M_C * \overrightarrow{acc_{18-x}} * \sin(2\pi - \varphi_6)) + (M_C * (g - \overrightarrow{acc_{18-y}}) * \cos(2\pi - \varphi_6)) \quad (7.20)$$

- Momento flettente

$$M_{f\ 18} = T_{18\_6} * Z_{22} \quad (7.21)$$

## **Membro D**

### Tratto 11-19:

- Sforzo normale

$$N_{11_19} = (-X_3 * \cos(\varphi_{10})) + (-Y_3 * \sin(\varphi_{10})) \quad (7.22)$$

- Taglio

$$T_{11_19} = (-X_3 * \sin(\varphi_{10})) + (-Y_3 * \cos(\varphi_{10})) \quad (7.23)$$

### Tratto 18-6:

- Sforzo normale

$$N_{18_6} = N_{11_19} + (-M_D * \overrightarrow{acc_{19-x}} * \cos(\varphi_{10})) + (M_D * (g - \overrightarrow{acc_{19-y}}) * \sin(\varphi_{10})) \quad (7.24)$$

- Taglio

$$T_{18_6} = T_{11_19} + (M_D * \overrightarrow{acc_{19-x}} * \sin(\varphi_{10})) + (M_D * (g - \overrightarrow{acc_{19-y}}) * \cos(\varphi_{10})) \quad (7.25)$$

- Momento flettente

$$M_{f\ 19} = T_{19_6} * Z_{23} \quad (7.26)$$

## **7.2 Raccolta dati**

Sono riportati qui di seguito i valori massimi e minimi di sforzo normale, taglio e momento flettente nei punti 7,11,16,17,18,19.

La ricerca di questi valori è stata effettuata sulla base della mappatura relativa al piano (X,Y), imponendo i classici input:

- Numero di campionamento = 50
- Tempo ciclo = 2,2 secondi
- $n_x = 8$
- $n_y = 8$

Sono stati valutati cinque carichi differenti: pinza vuota, 25 Kg, 50 Kg, 100 Kg, 150 Kg. Come prima, questi valori si riferiscono al carico da trasportare ed è esclusa la massa della pinza.

Per ogni combinazione di movimentazione sono stati salvati sforzo normale, taglio e momento flettente minimi e massimi. Nei membri ternari sarà possibile vedere che tutte e tre le sollecitazioni

aumenteranno proporzionalmente con l'aumentare del carico, mentre nei membri binari aumenterà esclusivamente lo sforzo normale, come ovvio che sia per la natura dei membri.

## MEMBRO A

### Punto 16

-1038	-1322	-1607	-2176	-2746	Sforzo normale minimo [N]
194	258	321	448	575	Sforzo normale massimo [N]
-1295	-1607	-1919	-2543	-3167	Taglio minimo [N]
595	741	887	1179	1470	Taglio massimo [N]
-516	-839	-1161	-1807	-2452	Momento flettente minimo [Nm]
238	387	536	834	1131	Momento flettente massimo [Nm]
0	25	50	100	150	Carico [Kg]

Tabella 7.1: sollecitazioni nel punto 16.

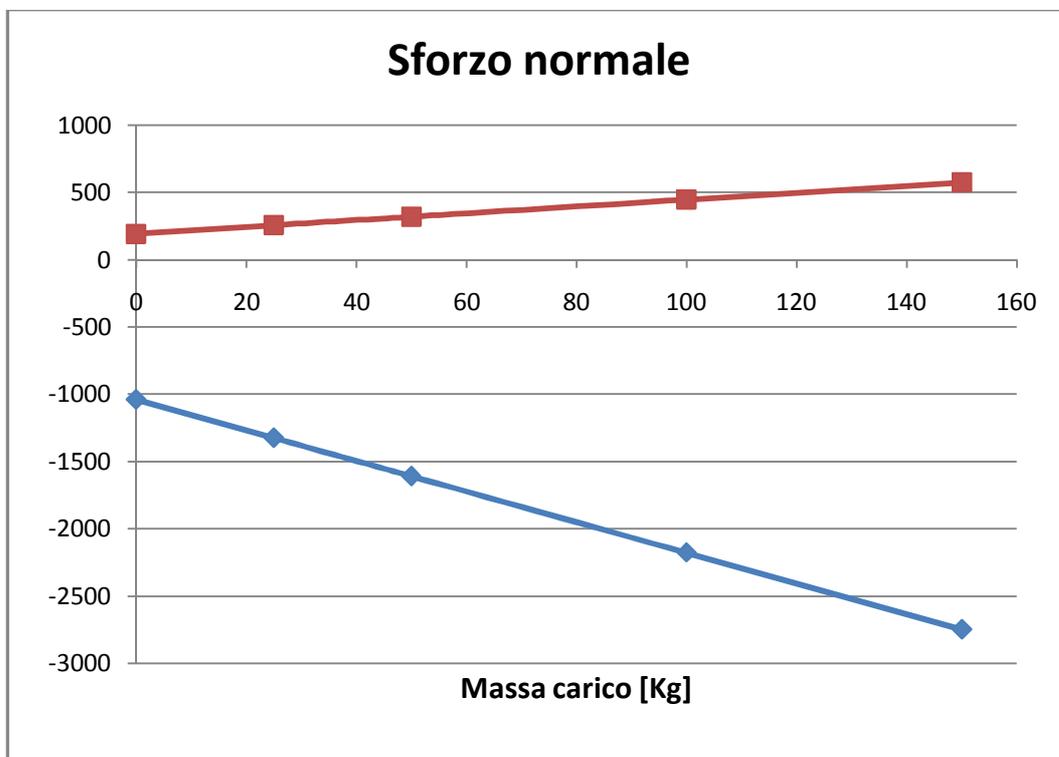
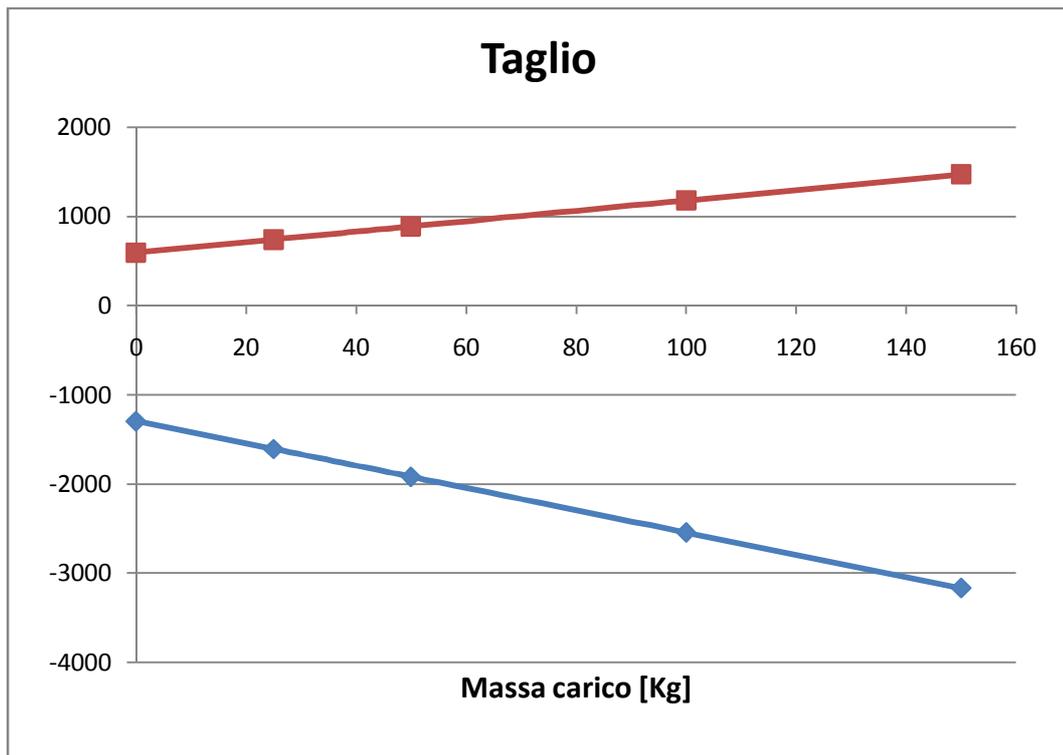
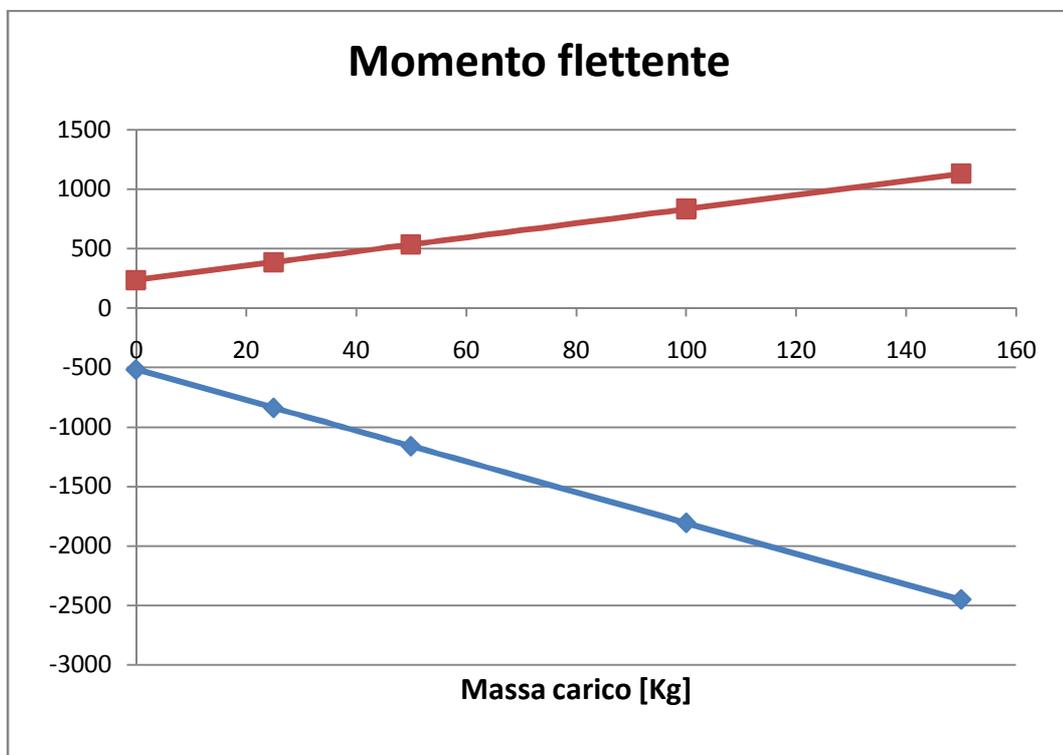


Figura 7.2: sforzo normale nel punto 16 al variare del carico.



**Figura 7.3: taglio nel punto 16.**



**Figura 7.4: momento flettente nel punto 16.**

## Punto 11

-1696	-2356	-3015	-4342	-5675	Sforzo normale minimo [N]
6069	8626	11183	16297	21412	Sforzo normale massimo [N]
-2180	-2488	-2796	-3415	-4039	Taglio minimo [N]
1201	1277	1353	1596	1888	Taglio massimo [N]
-360	-368	-391	-478	-566	Momento flettente minimo [Nm]
654	766	887	1130	1372	Momento flettente massimo [Nm]
0	25	50	100	150	Carico [Kg]

Tabella 7.1: sollecitazioni nel punto 11.

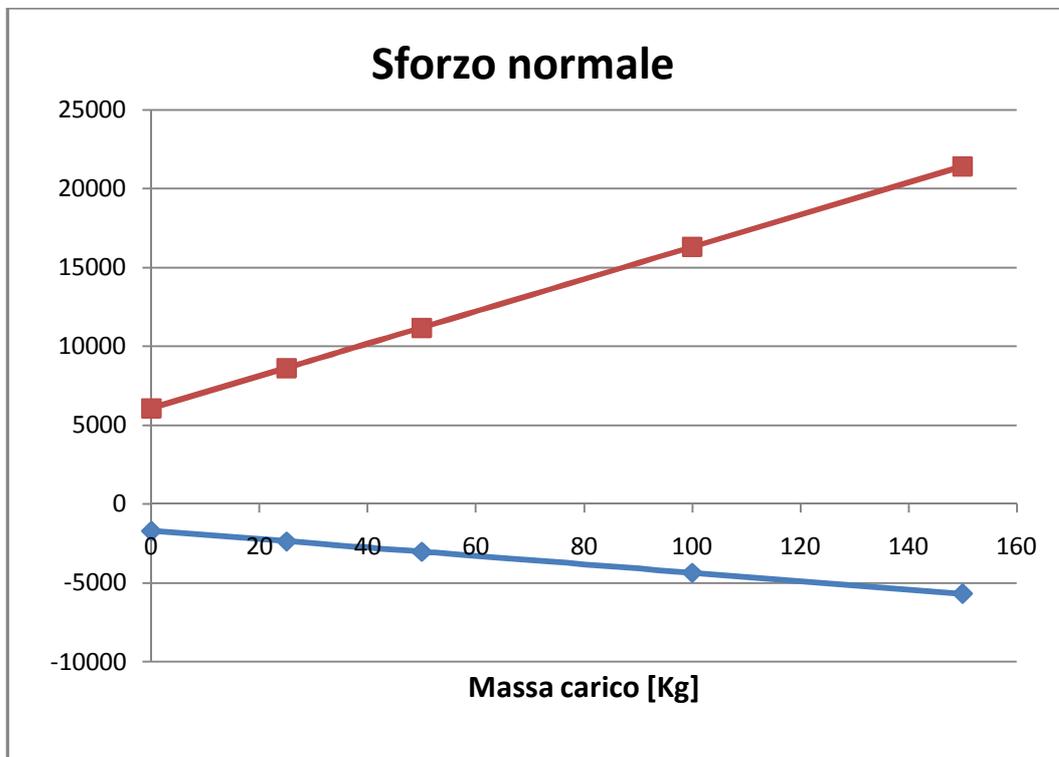
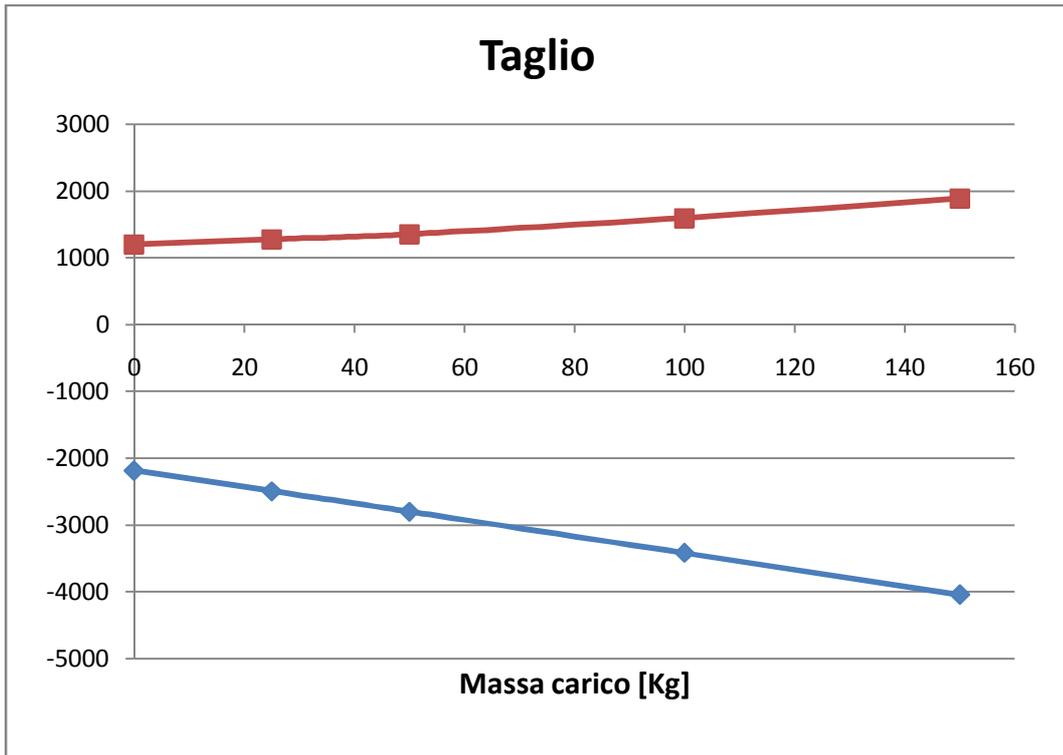
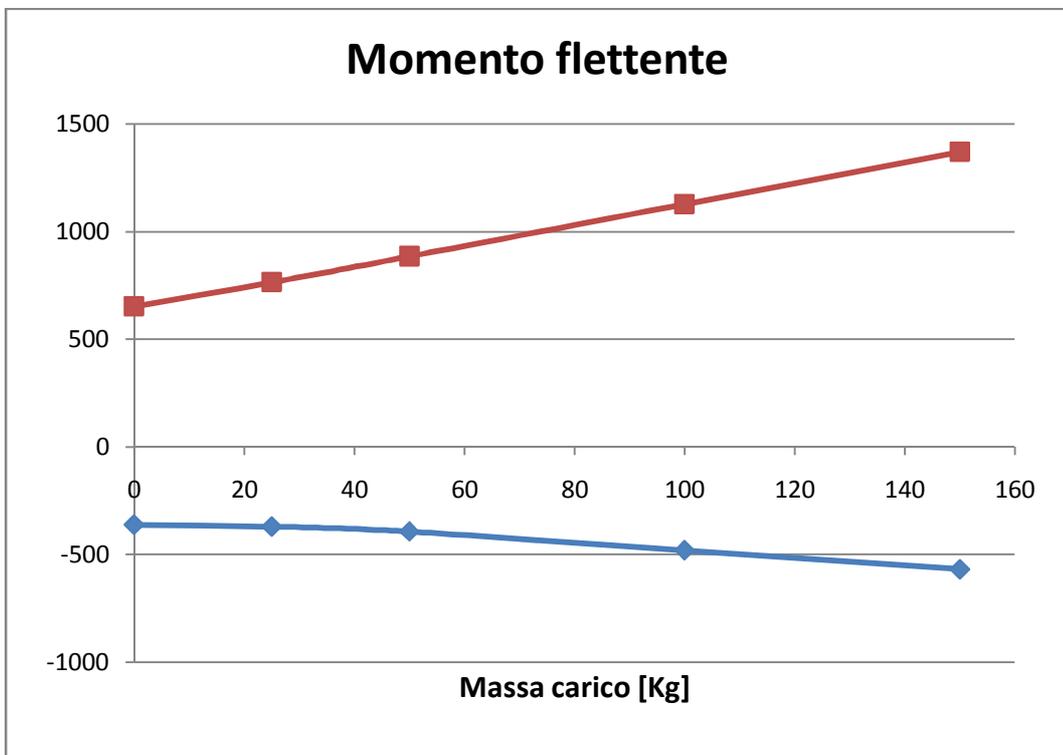


Figura 7.5: sforzo normale nel punto 11 al variare del carico.



**Figura 7.6: taglio nel punto 11.**



**Figura 7.7: momento flettente nel punto 11.**

## MEMBRO B

### Punto 17

-1958	-2618	-3277	-4596	-5916	Sforzo normale minimo [N]
6716	8633	11192	16312	21431	Sforzo normale massimo [N]
-1937	-1962	-2038	-2209	-2500	Taglio minimo [N]
3565	3874	4182	4955	5762	Taglio massimo [N]
-948	-968	-1029	-1260	-1490	Momento flettente minimo [Nm]
1722	2018	2337	2974	3612	Momento flettente massimo [Nm]
0	25	50	100	150	Carico [Kg]

Tabella 7.1: sollecitazioni nel punto 17 al variare del carico.

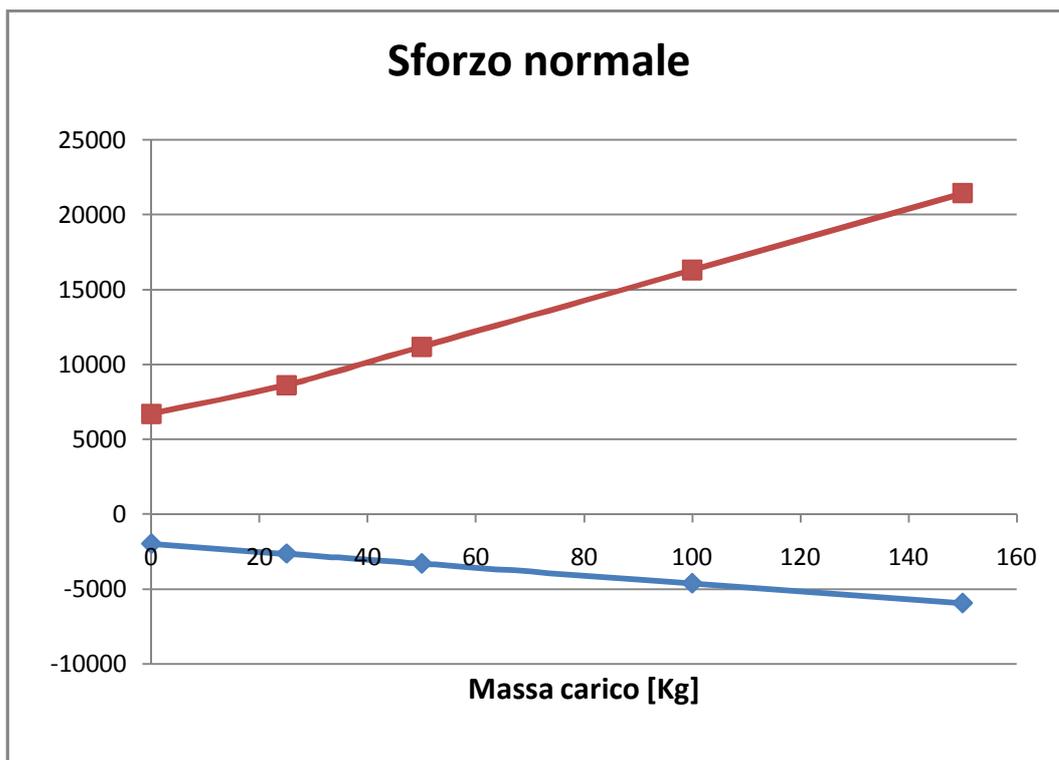
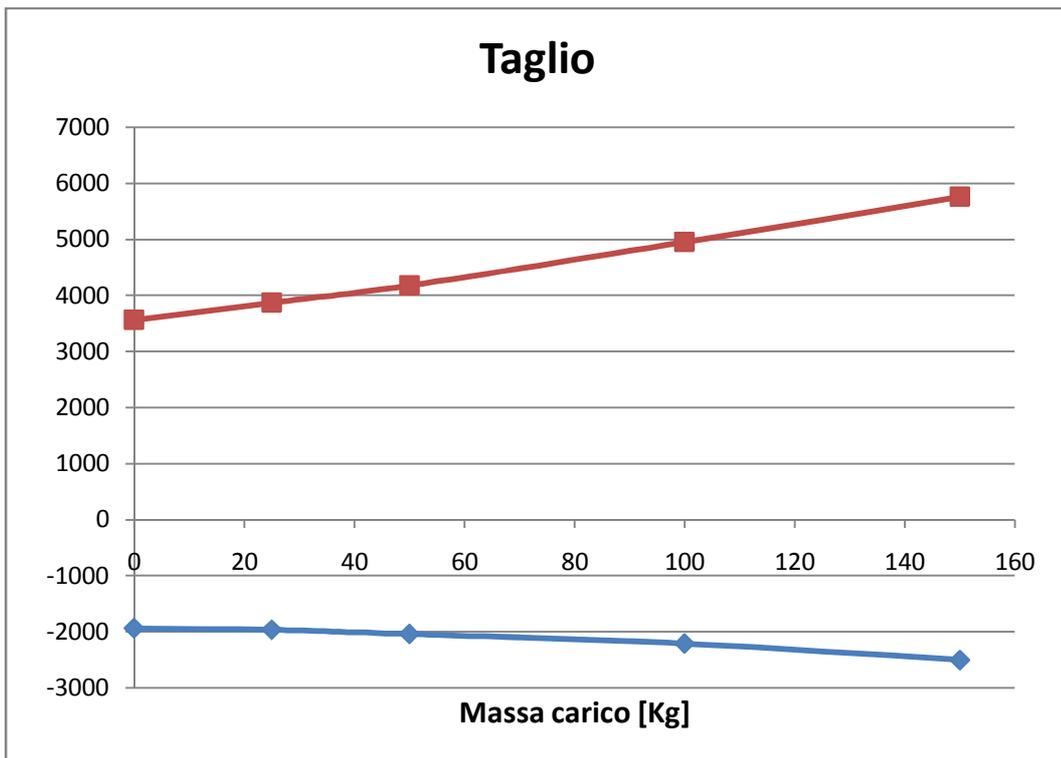
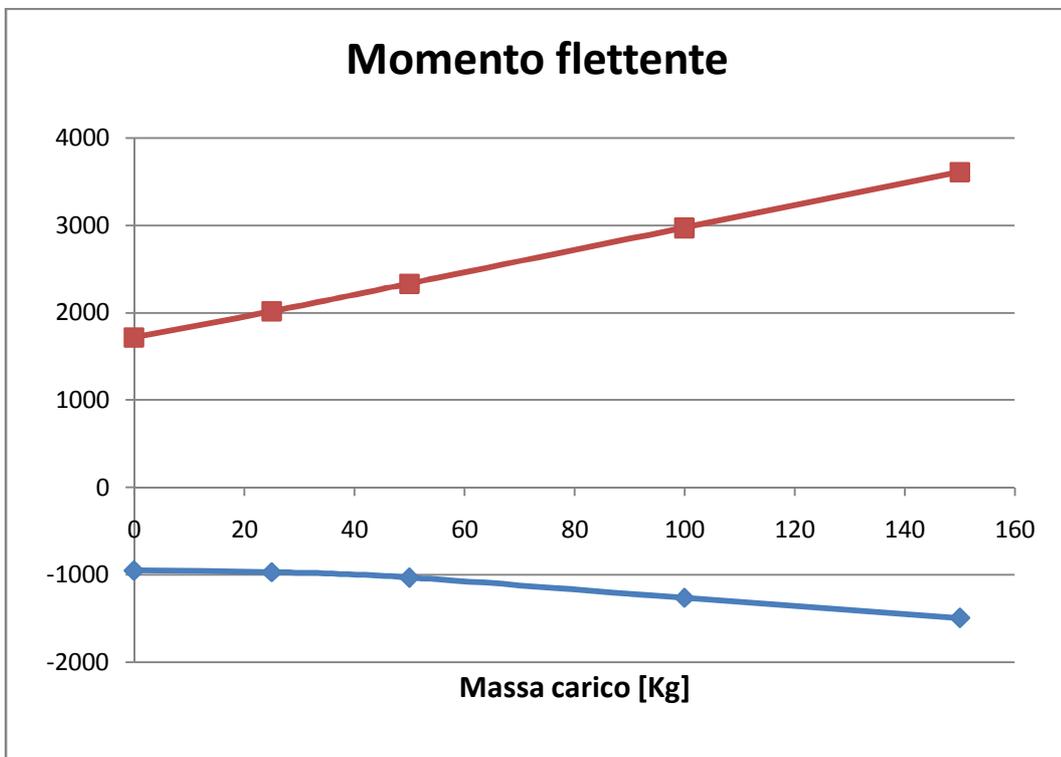


Figura 7.8: sforzo normale nel punto 17.



**Figura 7.9: taglio nel punto 17.**



**Figura 7.10: momento flettente nel punto 17.**

## Punto 7

-13270	-14172	-15073	-16876	-18678	Sforzo normale minimo [N]
13856	15193	16530	19203	22023	Sforzo normale massimo [N]
-12289	-14279	-16296	-20331	-24365	Taglio minimo [N]
6583	6404	6988	8448	9907	Taglio massimo [N]
-3072	-3570	-4074	-5083	-6091	Momento flettente minimo [Nm]
1646	1601	1747	2112	2477	Momento flettente massimo [Nm]
0	25	50	100	150	Carico [Kg]

Tabella 7.1: sollecitazioni nel punto 7 al variare del carico.

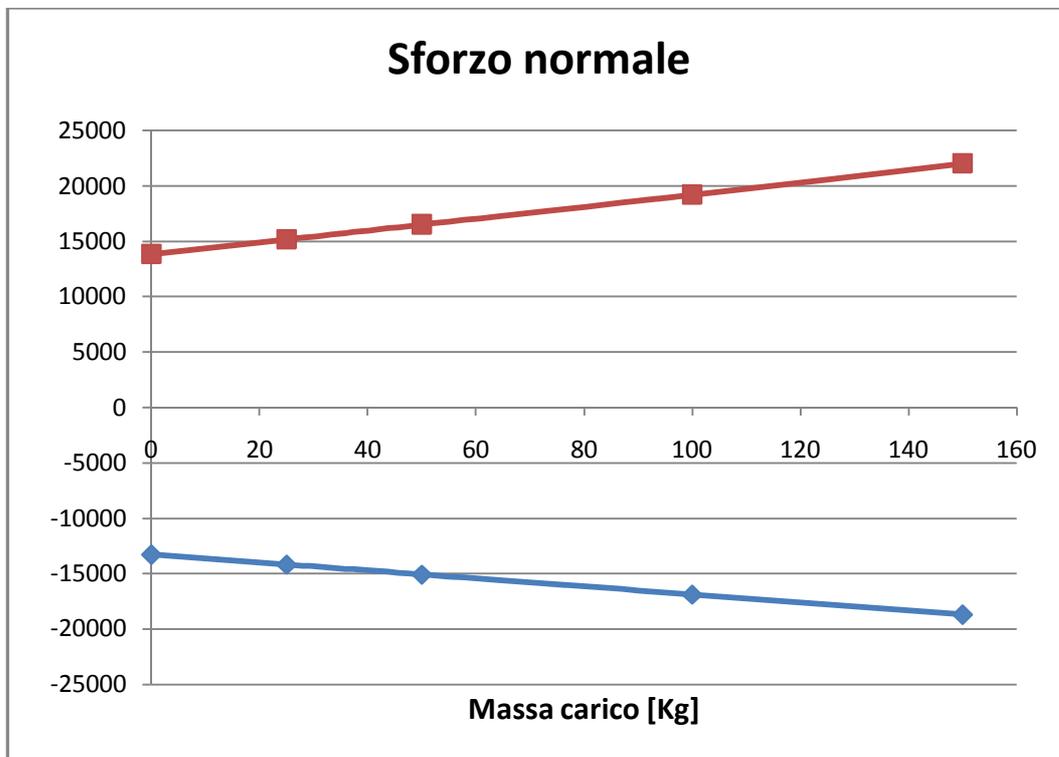
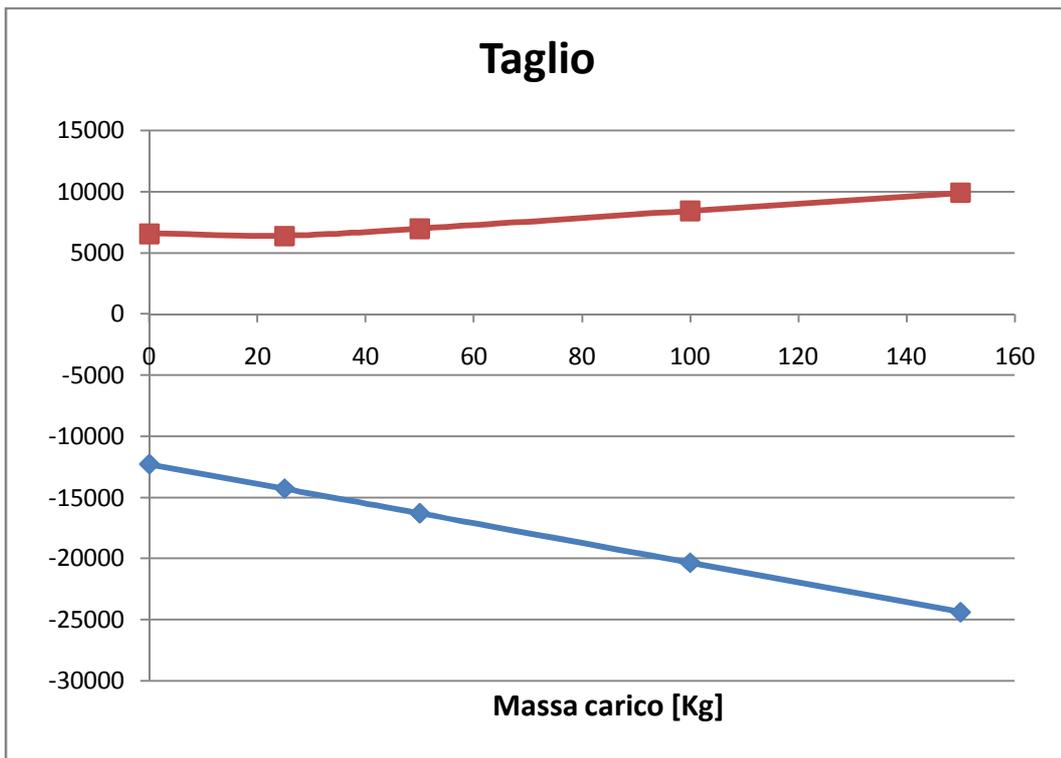
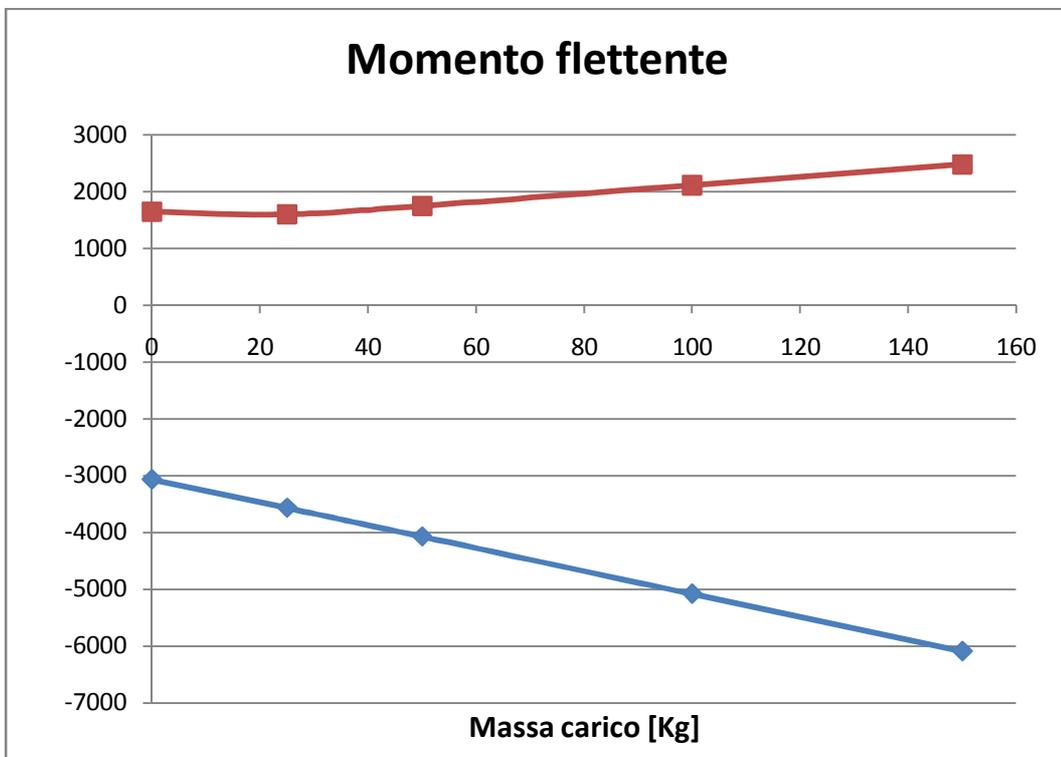


Figura 7.11: sforzo normale nel punto 7.



**Figura 7.12: taglio nel punto 7.**



**Figura 7.13: momento flettente nel punto 7.**

## MEMBRO C

### Punto 18

-23909	-26537	-29165	-34422	-40302	Sforzo normale minimo [N]
12455	12163	12311	13543	14775	Sforzo normale massimo [N]
-120	-120	-120	-120	-120	Taglio minimo [N]
201	201	201	201	201	Taglio massimo [N]
-22	-22	-22	-22	-22	Momento flettente minimo [Nm]
4	4	4	4	4	Momento flettente massimo [Nm]
0	25	50	100	150	Carico [Kg]

Tabella 7.1: sollecitazioni nel punto 18 al variare del carico.

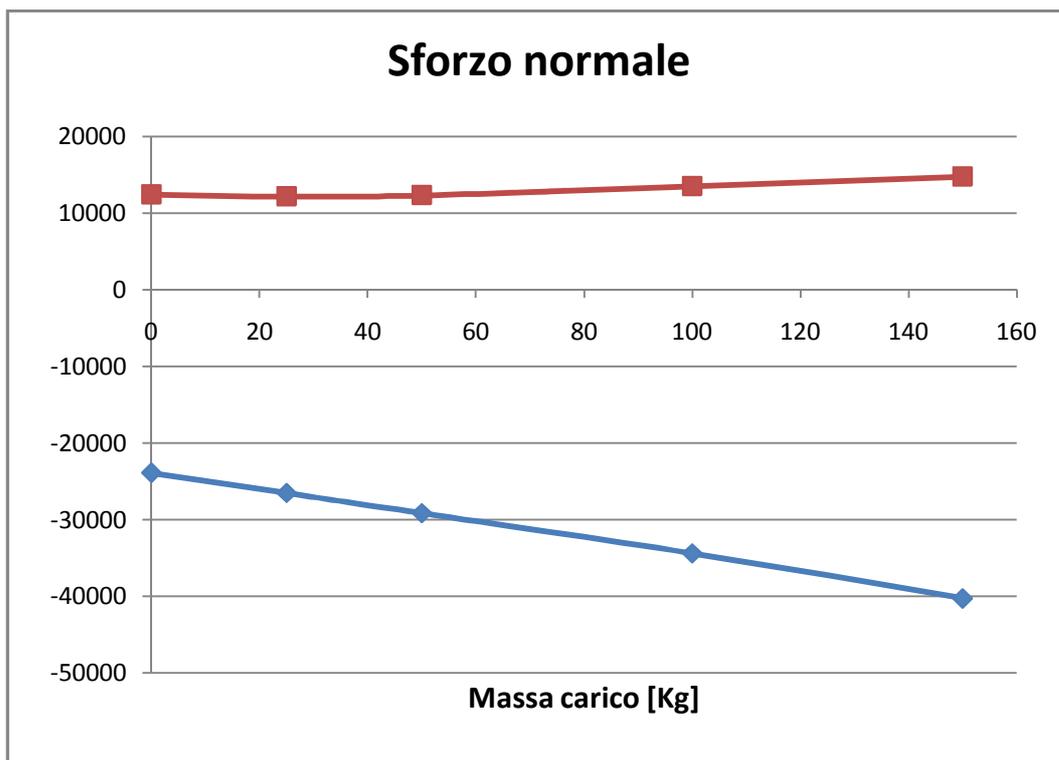
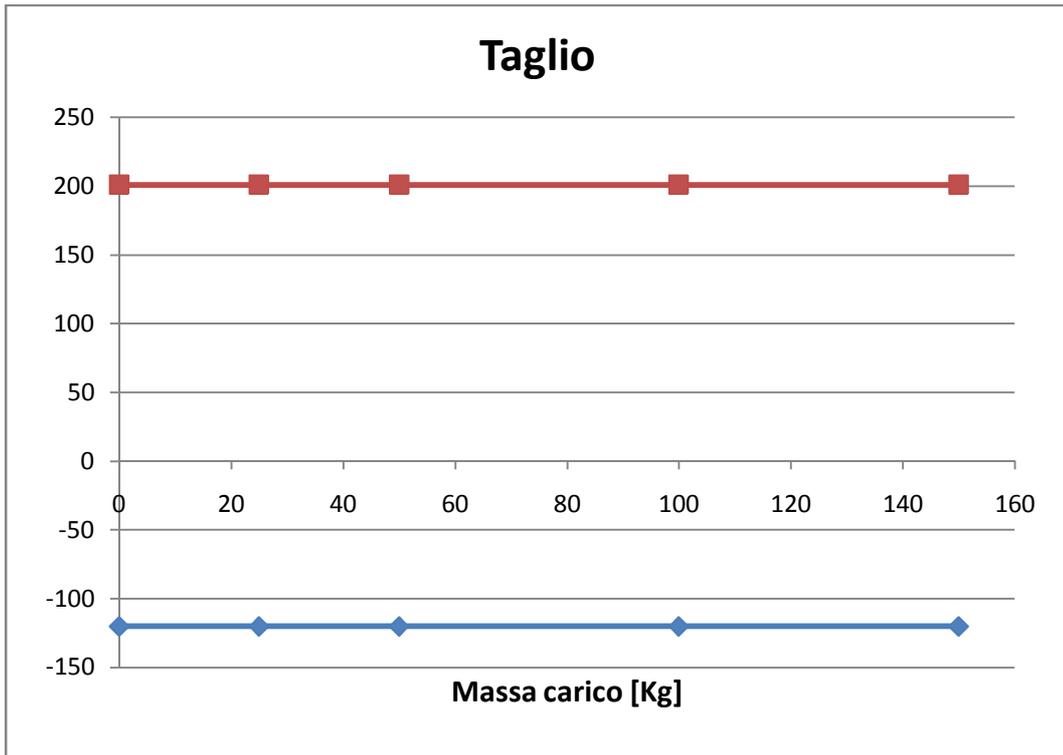
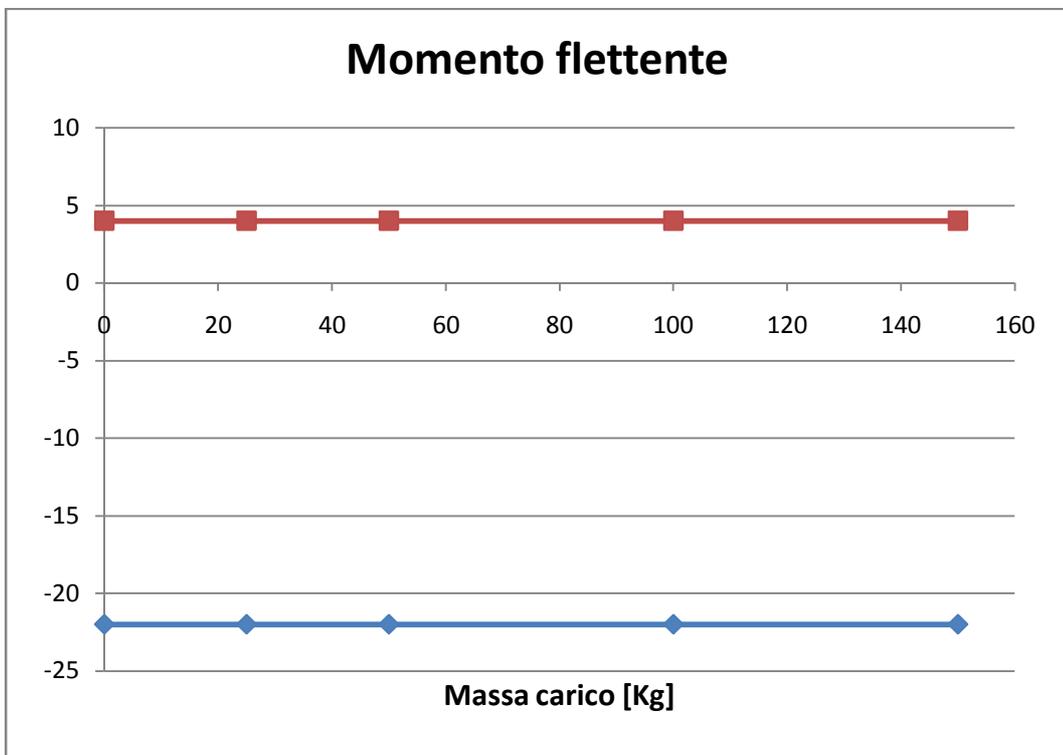


Figura 7.14: sforzo normale nel punto 18.



**Figura 7.15: taglio nel punto 18.**



**Figura 7.16: momento flettente nel punto 18.**

## MEMBRO D

### Punto 19

-7462	-10158	-12853	-18245	-23636	Sforzo normale minimo [N]
1365	1922	2481	3609	4743	Sforzo normale massimo [N]
-692	-692	-692	-692	-692	Taglio minimo [N]
913	913	913	913	913	Taglio massimo [N]
-327	-327	-327	-327	-327	Momento flettente minimo [Nm]
134	134	134	134	134	Momento flettente massimo [Nm]
0	25	50	100	150	Carico [Kg]

Tabella 7.1: sollecitazioni nel punto 19 al variare del carico.

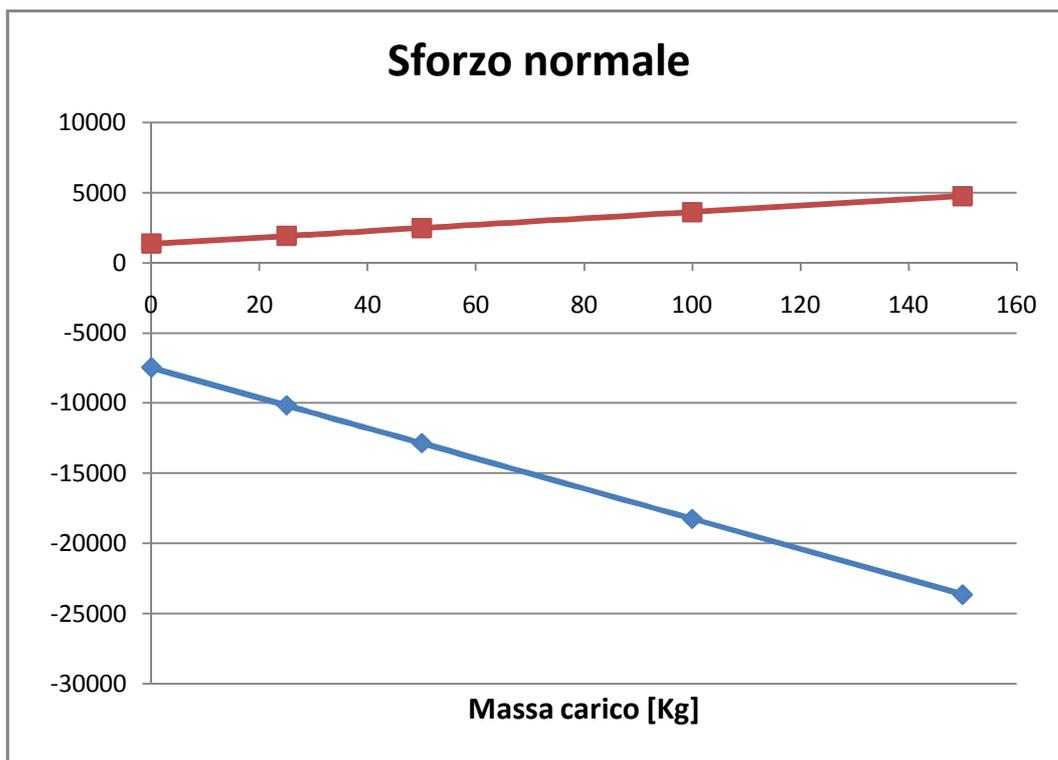
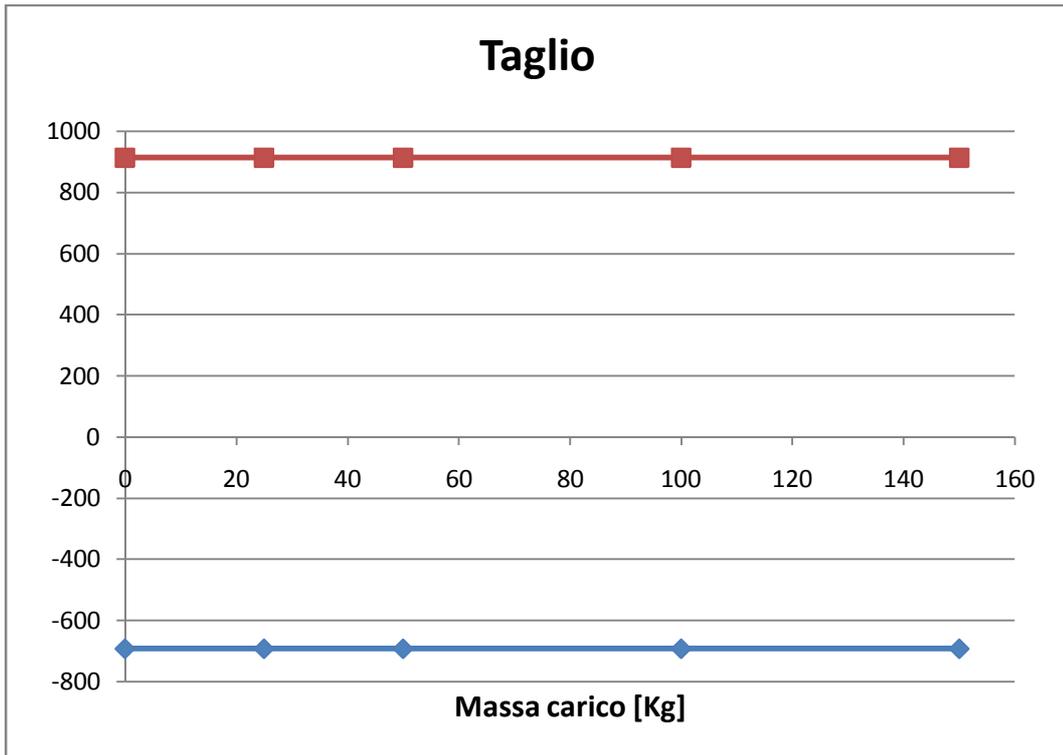
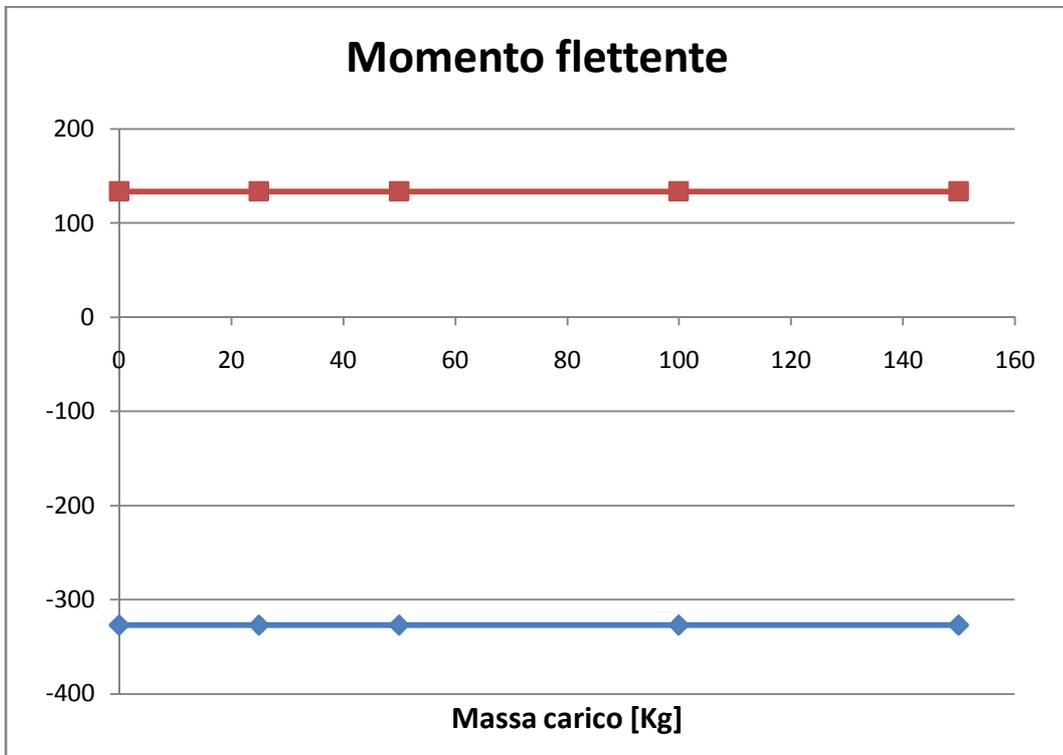


Figura 7.17: sforzo normale nel punto 19.



**Figura 7.18: taglio nel punto 19.**



**Figura 7.19: momento flettente nel punto 19.**



# Capitolo 8

## BILANCIAMENTO STATICO

### 8.1 Introduzione

Per ottimizzare le prestazioni del manipolatore “Antrop”, si è deciso di intraprendere la strada del bilanciamento statico.

Un meccanismo è definito “bilanciato staticamente” se, indipendentemente dalla configurazione assunta, non sono richieste azioni esterne per mantenerlo in stato di quiete. In tale circostanza, le azioni esercitate dagli attuatori impartiscono il moto ai membri mobili, ma non forniscono alcun contributo per la compensazione dei carichi gravitazionali, ovvero del peso dei membri stessi: si ottiene quindi una condizione di equilibrio indifferente, ovvero l’energia potenziale totale del sistema:

$$V_{Tot} = cost. \quad (8.1)$$

Si definisce, invece, “bilanciato dinamicamente” un meccanismo per il quale siano nulli sia la risultante sia il momento risultante, rispetto ad un polo arbitrario, delle forze d’inerzia.

Le metodologie più comuni di compensazione delle forze gravitazionali sono essenzialmente due, ovvero il bilanciamento con masse e il bilanciamento tramite elementi elastici.

Seguendo un approccio di bilanciamento con masse, il bilanciamento statico è ottenuto mantenendo costante l’energia potenziale gravitazionale totale del meccanismo (per ogni sua configurazione assumibile) mediante una opportuna distribuzione della massa dei membri mobili, generalmente realizzata tramite l’applicazione di contrappesi in posizioni appropriate.

Impiegando una metodologia di compensazione elastica, il bilanciamento statico viene realizzato tramite l’introduzione di

opportuni elementi elastici, che rendono l'energia potenziale totale del sistema, data dalla somma del contributo gravitazionale e di quello elastico, invariante rispetto alla configurazione assunta dal meccanismo. [3]

Il manipolatore "Antrop" presenta carichi statici preponderanti rispetto a quelli inerziali. Si può verificare, infatti, che le massime accelerazioni dei moventi sono di  $0,3 \text{ m/s}^2$  per l'attuatore x e  $0,5 \text{ m/s}^2$  per l'attuatore y. Ricordando la proporzionalità di movimentazione verticale e orizzontale, caratteristica tipica di questo robot, è immediato dire che la pinza presenta accelerazioni massime di  $1,8 \text{ m/s}^2$  in direzione x e  $2,5 \text{ m/s}^2$  in direzione y.

E' giusto quindi attendersi una riduzione dei carichi sui motori dopo aver bilanciato staticamente.

## 8.2 Energia potenziale del robot

Il bilanciamento con masse o molle si basa sull'annullamento della variazione dell'energia potenziale della masse in gioco rispetto ad ogni variabile indipendente con le quali è definito il sistema. Dal punto di vista matematico bisogna porre uguale a zero le derivate parziali rispetto alla due variabili.

In forma vettoriale l'energia potenziale di una generica massa  $M$  è:

$$V_g = -M * \vec{g} \cdot \vec{r} \quad (8.2)$$

Dove  $\vec{g} = (0, -g)$  è il vettore gravità, mentre  $\vec{r}$  è il vettore posizione della massa generica  $M$ . Nel caso in esame, per descrivere il manipolatore sono state prese come variabili indipendenti  $\alpha$  e  $\beta$ . Avendo  $\vec{g}$  ed  $\vec{r}$  la stessa retta d'azione, d'ora in poi verranno scritte come scalari, in particolare si indicherà con  $y_i$  la componente verticale della posizione della i-esima massa.

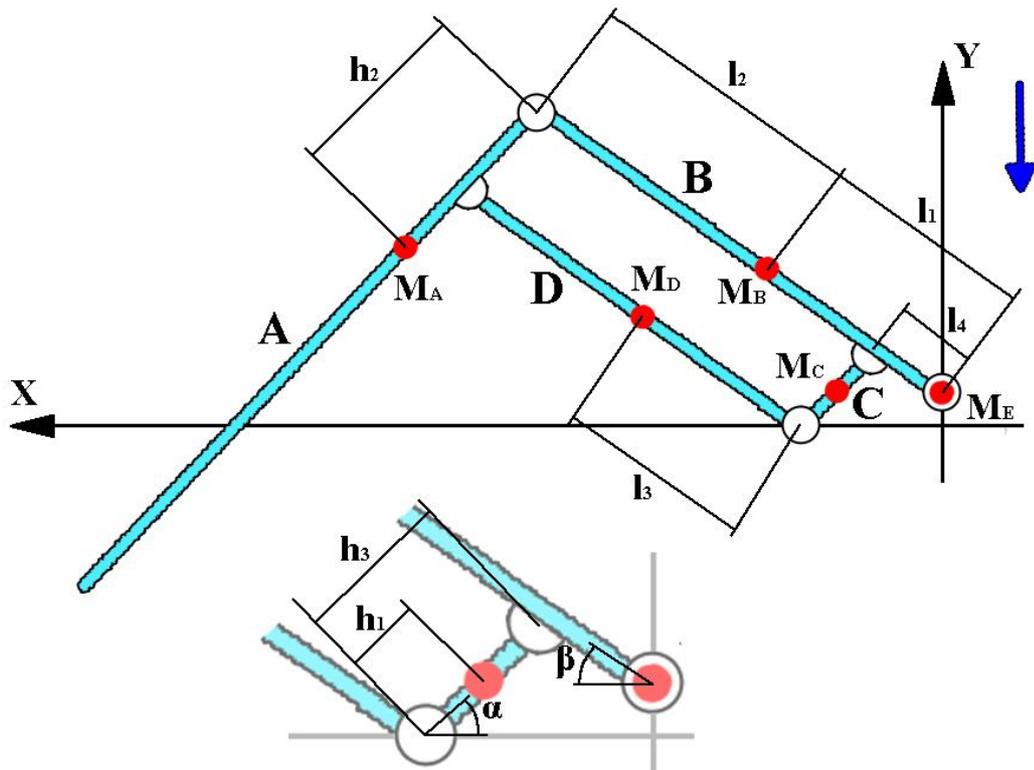


Figura 8.1: angoli indipendenti e lunghezze caratteristiche.

Le componenti verticali delle posizioni di ogni massa sono:

$$y_A = h_3 * \sin \alpha + (l_2 + l_1 - l_4) * \sin \beta - h_2 * \sin \alpha \quad (8.3)$$

$$y_B = h_3 * \sin \alpha + (l_1 - l_4) * \sin \beta \quad (8.4)$$

$$y_C = h_1 * \sin \alpha \quad (8.5)$$

$$y_D = l_3 * \sin \beta \quad (8.6)$$

$$y_E = h_3 * \sin \alpha + l_4 * \sin \beta \quad (8.7)$$

L'energie potenziali di ogni massa risultano essere:

$$V_{gA} = M_A * g * (h_3 * \sin \alpha + (l_2 + l_1 - l_4) * \sin \beta - h_2 * \sin \alpha) \quad (8.8)$$

$$V_{gB} = M_B * g * (h_3 * \sin \alpha + (l_1 - l_4) * \sin \beta) \quad (8.9)$$

$$V_{gC} = M_C * g * (h_1 * \sin \alpha) \quad (8.10)$$

$$V_{gD} = M_D * g * (l_3 * \sin \beta) \quad (8.11)$$

$$V_{gE} = M_E * g * (h_3 * \sin \alpha + l_4 * \sin \beta) \quad (8.12)$$

La somma di ogni energia potenziale definisce l'energia potenziale totale del sistema:

$$V_{gTot} = V_{gA} + V_{gB} + V_{gC} + V_{gD} + V_{gE} \quad (8.13)$$

La derivata parziale rispetto ad  $\alpha$ :

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_{gTot}}{\partial \alpha} &= (M_A * g * (h_3 - h_2) * \cos \alpha) \\ &\quad + (M_B * g * h_3 * \cos \alpha) + (M_C * g * h_1 * \cos \alpha) \\ &\quad + (M_E * g * h_3 * \cos \alpha) \\ &= g \\ &\quad * ((M_A + M_B + M_E) * h_3 + M_C * h_1 - M_A * h_2) \\ &\quad * \cos \alpha \end{aligned} \quad (8.14)$$

La derivata parziale rispetto ad  $\beta$ :

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_{gTot}}{\partial \beta} &= (M_A * g * (l_2 + l_1 - l_4) * \cos \beta) \\ &\quad + (M_B * g * (l_1 - l_4) * \cos \beta) \\ &\quad + (M_D * g * l_3 * \cos \beta) \\ &\quad + (M_E * g * (-l_4) * \cos \beta) \\ &= g * (M_A * (l_2 + l_1 - l_4) + M_B * (l_1 - l_4) + M_D \\ &\quad * l_3 - M_E * l_4) * \cos \beta \end{aligned} \quad (8.15)$$

Si pongono uguale a zero le due derivate parziali:

$$\begin{cases} \frac{\partial V_{gTot}}{\partial \alpha} = 0 \\ \frac{\partial V_{gTot}}{\partial \beta} = 0 \end{cases} \quad (8.16)$$

I valori delle lunghezze riportate in figura 8.1 sono:

$$\begin{cases} l_1 = 0,7 \text{ m} \\ l_2 = 0,8 \text{ m} \\ l_3 = 0,625 \text{ m} \\ l_4 = 0,25 \text{ m} \end{cases} \quad \begin{cases} h_1 = 0,15 \text{ m} \\ h_2 = 0,8 \text{ m} \\ h_3 = 0,3 \text{ m} \end{cases}$$

### 8.3 Bilanciamento con masse

Per poter annullare la variazione di energia potenziale bisogna porre uguale a zero quello che è all'interno della parentesi delle due equazioni:

$$\begin{cases} \frac{\partial V_{gTot}}{\partial \alpha} = 0 = g * \underbrace{((M_A + M_B + M_E) * h_3 + M_C * h_1 - M_A * h_2)}_{(8.17)} * \cos \alpha \\ \frac{\partial V_{gTot}}{\partial \beta} = 0 = g * \underbrace{(M_A * (l_2 + l_1 - l_4) + M_B * (l_1 - l_4) + M_D * l_3 - M_E * l_4)}_{(8.18)} * \cos \beta \end{cases}$$

Nella seconda equazione viene sfruttato il segno negativo presente davanti a  $M_E$ , quindi l'intenzione è quella di aumentare la massa in E:

$$(M_A * (l_2 + l_1 - l_4) + M_B * (l_1 - l_4) + M_D * l_3 - M_E * l_4) = 0 \quad (8.18)$$

Da cui:

$$\begin{aligned} M_E &= \frac{(M_A * (l_2 + l_1 - l_4) + M_B * (l_1 - l_4) + M_D * l_3)}{l_4} \\ &= \frac{(60 * (0,8 + 0,7 - 0,25) + 120 * (0,7 - 0,25) + 100 * (0,625))}{0,25} \\ &= 766 \text{ Kg} \end{aligned} \quad (8.19)$$

Per annullare, invece, la parentesi all'interno della prima equazione si è deciso di applicare un contrappeso in G, come si può vedere in fig. 8.2.

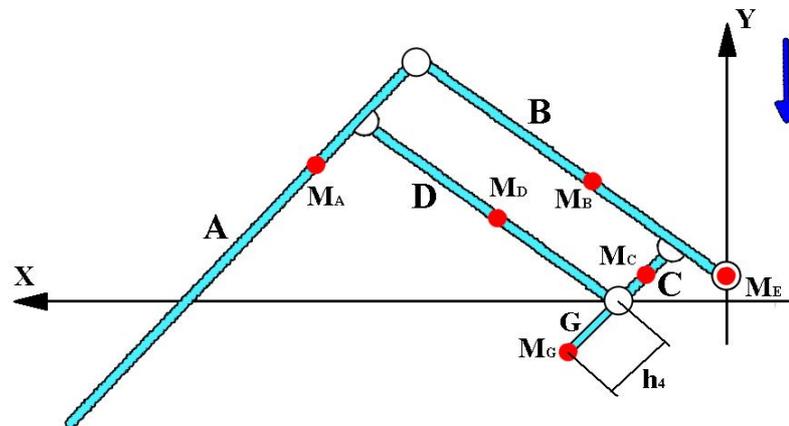


Figura 8.2: bilanciamento statico con masse: contrappesi nel punto G e nel punto E.

Il contrappeso G è solidale al membro C. Preme far notare come non solo sia incognita la massa G, ma anche la distanza  $h_4$ . Inizialmente si ricerca il prodotto di questi due valori. Procedendo analogamente alle altre masse, viene scritta prima la componente verticale del vettore posizione e successivamente l'energia potenziale della massa G:

$$y_G = -h_4 * \sin \alpha \quad (8.20)$$

$$V_{gG} = M_G * g * (-h_4 * \sin \alpha) \quad (8.21)$$

Derivando parzialmente rispetto alle due variabili indipendenti  $\alpha$  e  $\beta$ :

$$\frac{\partial V_{gG}}{\partial \alpha} = -M_G * g * h_4 * \cos \alpha \quad (8.22)$$

$$\frac{\partial V_{gG}}{\partial \beta} = \phi \quad (8.23)$$

Risulta evidente che la massa G non modifichi la variazione d'energia potenziale rispetto all'angolo  $\beta$ . Quindi è logico interessarsi solo alla variazione d'energia potenziale rispetto all'angolo  $\alpha$ . Sommando tutti i contributi presenti risulta essere:

$$\frac{\partial V_{gTot}}{\partial \alpha} = g * \underbrace{((M_A + M_B + M_E) * h_3 + M_C * h_1 - M_A * h_2 - M_G * h_4)}_{* \cos \alpha} \quad (8.24)$$

Ponendo uguale a zero la parentesi:

$$((M_A + M_B + M_E) * h_3 + M_C * h_1 - M_A * h_2 - M_G * h_4) = 0 \quad (8.25)$$

Si trova:

$$\begin{aligned} M_G * h_4 &= (M_A + M_B + M_E) * h_3 + M_C * h_1 - M_A * h_2 \\ &= (60 + 120 + 766) * (0,3) + 30 * (0,15) \\ &\quad - 60 * (0,8) = 240,3 \text{ Kg} * m \end{aligned} \quad (8.26)$$

Ponendo  $h_4 = 0,3 \text{ m}$ ,  $M_G$  ne deriva che la massa in G è pari a 468 Kg.

## 8.4 Verifica dinamica del bilanciamento statico con masse

Utilizzando il modello matematico realizzato in Matlab, è semplice introdurre i contrappesi nei punti G ed E che garantiscono il bilanciamento statico del robot. Sfruttando l'algoritmo della mappatura relativa al piano (X,Y) è possibile fare un confronto tra il sistema non bilanciato e quello bilanciato con masse sia per quel che riguarda le coppie massime richieste, che tra le medie delle coppie rms. Sono stati mantenuti i valori di numero di campionamento e tempo ciclo. Per prima cosa è necessario ridisegnare il membro C (Fig 8.2) e riscrivere per esso le equazioni di equilibrio statico.

### Equilibrio del membro C.

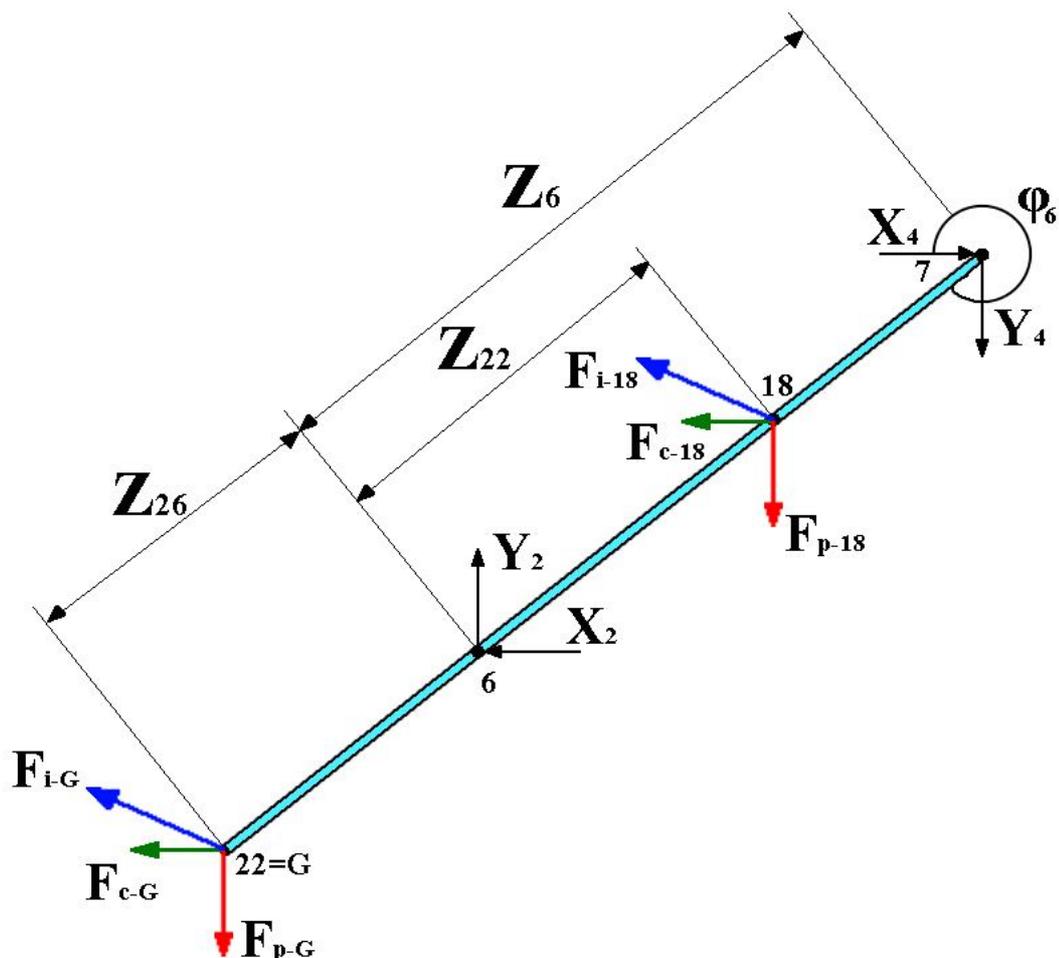


Figura 8.3: schema per l'equilibrio del membro C con contrappeso.

Definendo:

$$\begin{aligned}\overrightarrow{F_{l-G-x}} &= M_G * \overrightarrow{acc_{G-x}} : \text{comp in } x \text{ della forza di inerzia} \\ \overrightarrow{F_{l-G-y}} &= M_G * \overrightarrow{acc_{G-y}} : \text{comp. in } y \text{ della forza di inerzia} \\ \overrightarrow{F_{p-G}} &= M_G * \vec{g} : \text{forza peso} \\ \overrightarrow{F_{c-G}} &= M_G * \omega_{torretta}^2 * \vec{r}_G : \text{forza centrifuga}\end{aligned}$$

Dove:

$$\begin{aligned}\overrightarrow{acc_{G-x}} &= \text{componente } x \text{ dell'accelerazione del punto } G \text{ in } m/s^2 \\ \overrightarrow{acc_{G-y}} &= \text{componente } y \text{ dell'accelerazione del punto } G \text{ in } m/s^2 \\ M_G &= \text{massa del membro } G = 468 \text{ Kg} \\ M_E &= \text{massa dei membri traslati dal movente } Y = 766 \text{ Kg} \\ r_G &= \text{raggio del baricentro del punto } G \text{ in metri}\end{aligned}$$

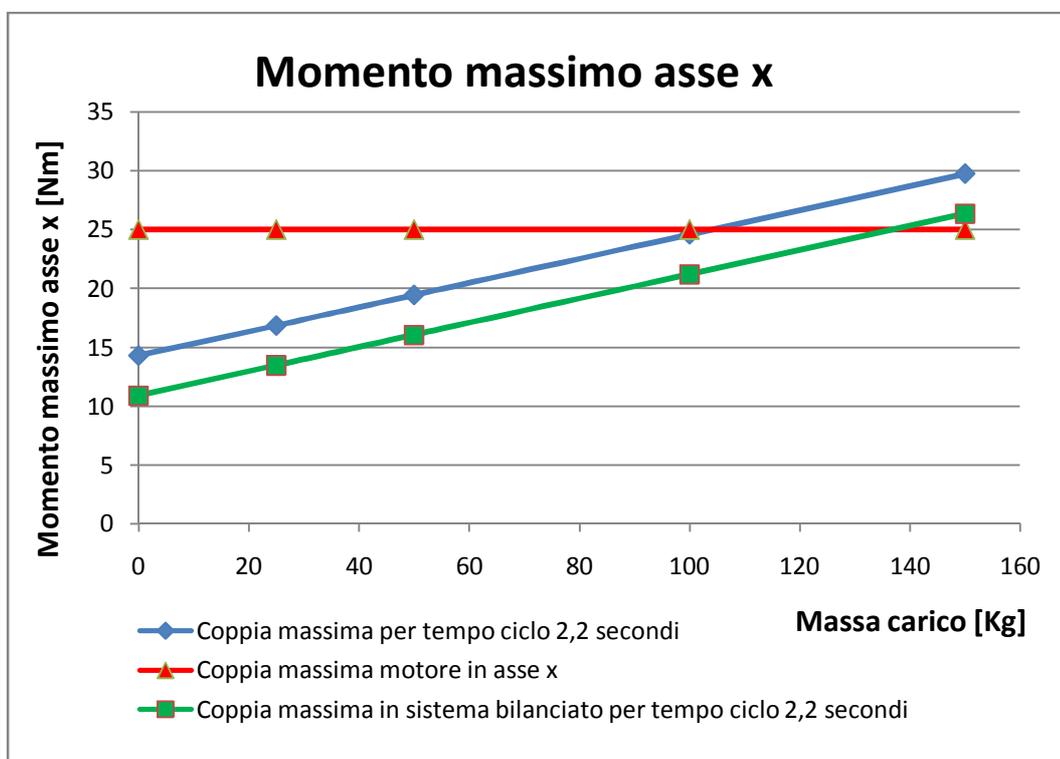
Le equazioni di equilibrio alla traslazione verticale e orizzontale e l'equilibrio alla rotazione rispetto al punto 7 sono:

$$\left\{ \begin{aligned}\overrightarrow{X_2} - \overrightarrow{X_4} &= \overrightarrow{F_{l-18-x}} - \overrightarrow{F_{c-18}} + \overrightarrow{F_{l-G-x}} - \overrightarrow{F_{c-G}} \\ \overrightarrow{Y_2} - \overrightarrow{X_4} &= \overrightarrow{F_{l-18-y}} - \overrightarrow{F_{p-18}} + \overrightarrow{F_{l-G-y}} - \overrightarrow{F_{p-G}} \\ -(\overrightarrow{X_2} * Z_6 * \sin \varphi_6) + (\overrightarrow{Y_2} * Z_6 * \cos \varphi_6) &= \\ &= -(\overrightarrow{F_{l-18-x}} * (Z_6 - Z_{22}) * \sin \varphi_6) + \\ &= -(\overrightarrow{F_{l-18-y}} * (Z_6 - Z_{22}) * \cos \varphi_6) + \\ &= -(\overrightarrow{F_{p-18}} * (Z_6 - Z_{22}) * \cos \varphi_6) + \\ &= -(\overrightarrow{F_{c-18}} * (Z_6 - Z_{22}) * \sin \varphi_6) + \\ &= +(J_C + M_C * (Z_6 - Z_{22})^2) * \dot{\vec{\omega}}_C + \\ &= -(\overrightarrow{F_{l-G-x}} * (Z_6 + Z_{26}) * \sin \varphi_6) + \\ &= -(\overrightarrow{F_{l-G-y}} * (Z_6 + Z_{26}) * \cos \varphi_6) + \\ &= -(\overrightarrow{F_{p-G}} * (Z_6 + Z_{26}) * \cos \varphi_6) + \\ &= -(\overrightarrow{F_{c-G}} * (Z_6 + Z_{26}) * \sin \varphi_6) + \\ &= +(M_G * (Z_6 + Z_{26})^2) * \dot{\vec{\omega}}_C\end{aligned}\right. \quad (8.27)$$

Anche in questo caso le coppie sono state tutte maggiorate del 10%, valore tipicamente utilizzato all'interno dell'azienda per tenere conto degli attriti nei giunti.

	0 Kg	25 Kg	50 Kg	100 Kg	150 Kg
Coppia asse x	10,89	13,46	16,05	21,20	26,35
Coppia rms asse x	2,1	2,31	2,79	3,39	4,05
Coppia asse y	19,77	23,45	27,18	34,47	42,1
Coppia rms asse y	3,73	3,97	5,36	9,97	14,94

**Tabella 8.1: tabella riepilogativa delle coppie massime e delle medie delle coppie rms.**



**Figura 8.4: grafico delle coppie massime all'asse x.**

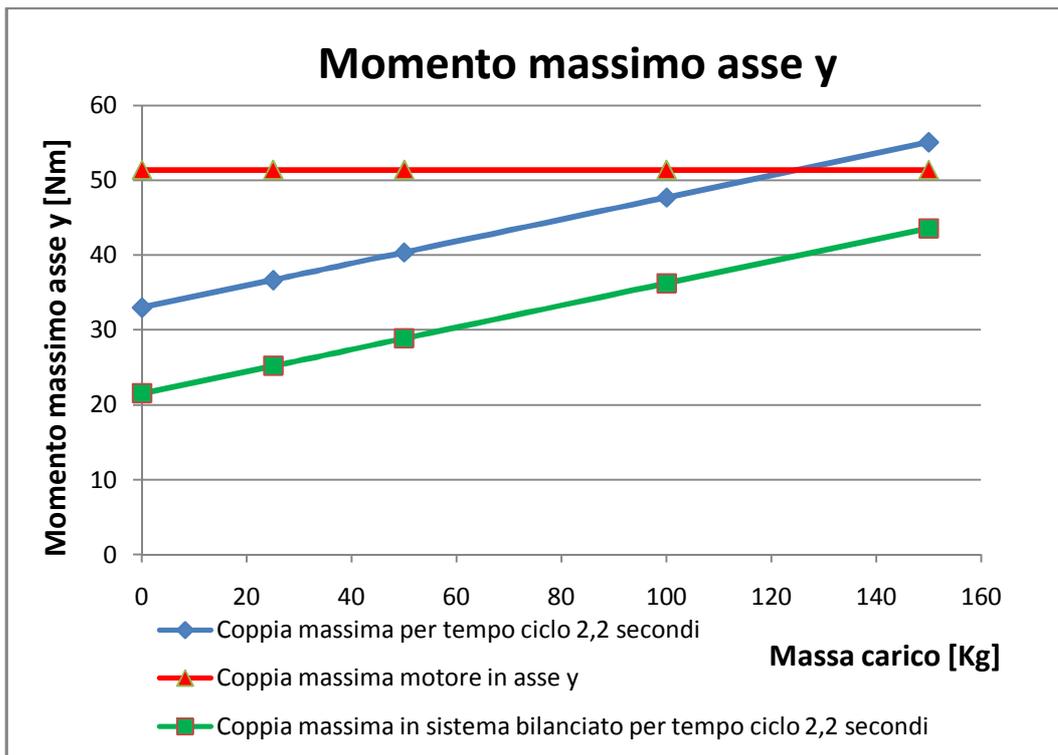


Figura 8.5: grafico delle coppie massime all'asse y.

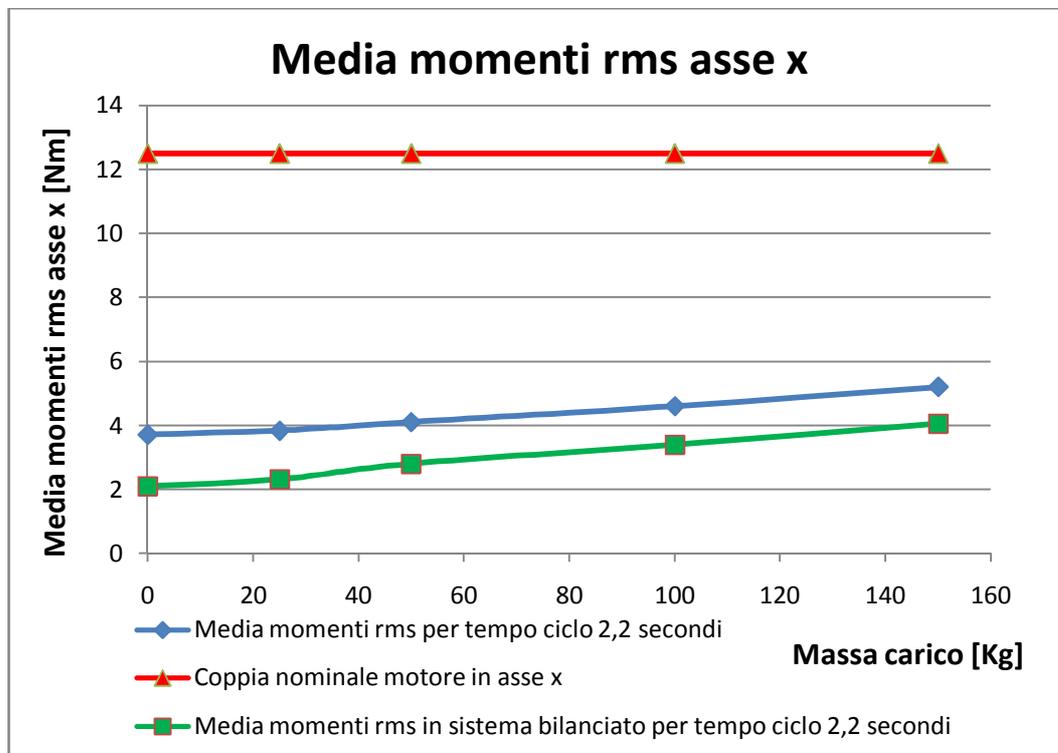


Figura 8.6: grafico delle medie delle coppie rms all'asse x.

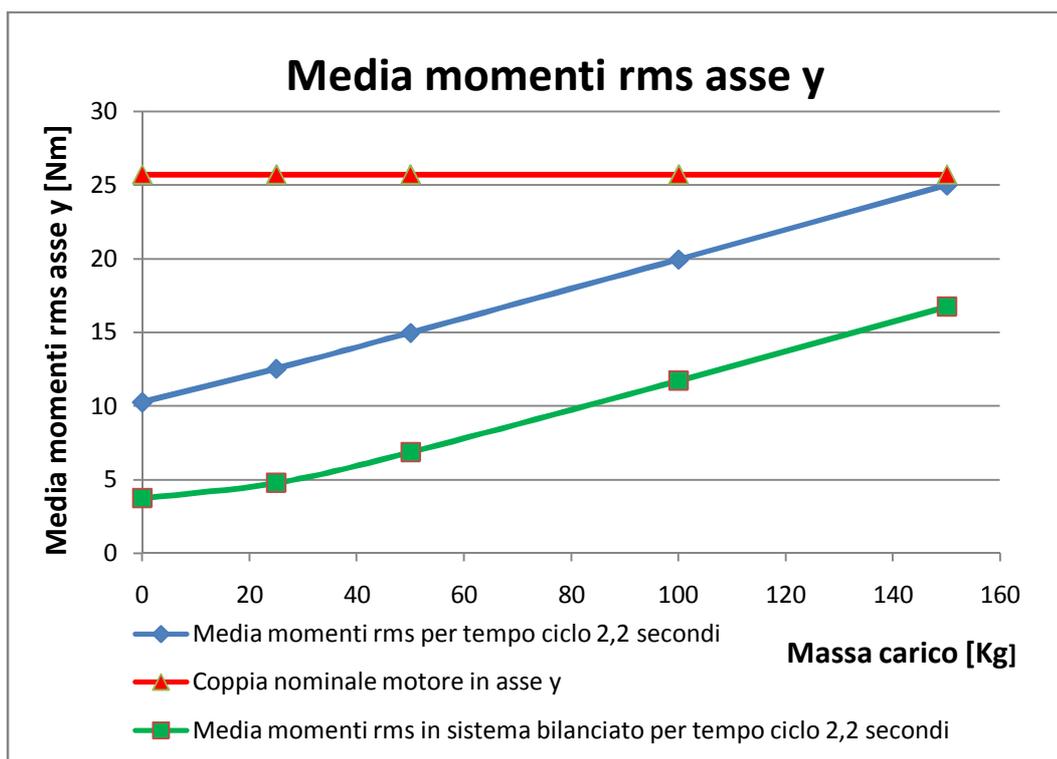


Figura 8.7: grafico delle medie delle coppie rms all'asse y.

Risulta evidente dai grafici che anche dal punto dinamico si ha un netto miglioramento:

- Coppia massima movente x: -3,4 Nm
- Coppia massima movente y: -11,5 Nm
- Media coppie rms movente x: -1,4 Nm
- Media coppie rms movente y: -7,8 Nm

Notare come l'azionamento orizzontale abbia aumentato la sua soglia di carico fino a 140 Kg, mentre l'azionamento verticale riesca a sostenere un carico superiore i 150 Kg. Di quest'ultimo è lecito pensare ad una possibile riprogettazione per ridurre la potenza elettrica richiesta.

Dai prossimi grafici, invece, risulta evidente un peggioramento nell'azionamento relativo alla rotazione della torretta.

- Coppia massima movente relativo alla rotazione torretta: 4,7 Nm
- Media coppie rms movente relativo alla rotazione torretta: 2,5 Nm

L'odierno azionamento è in grado comunque di sopportare i carichi richiesti.

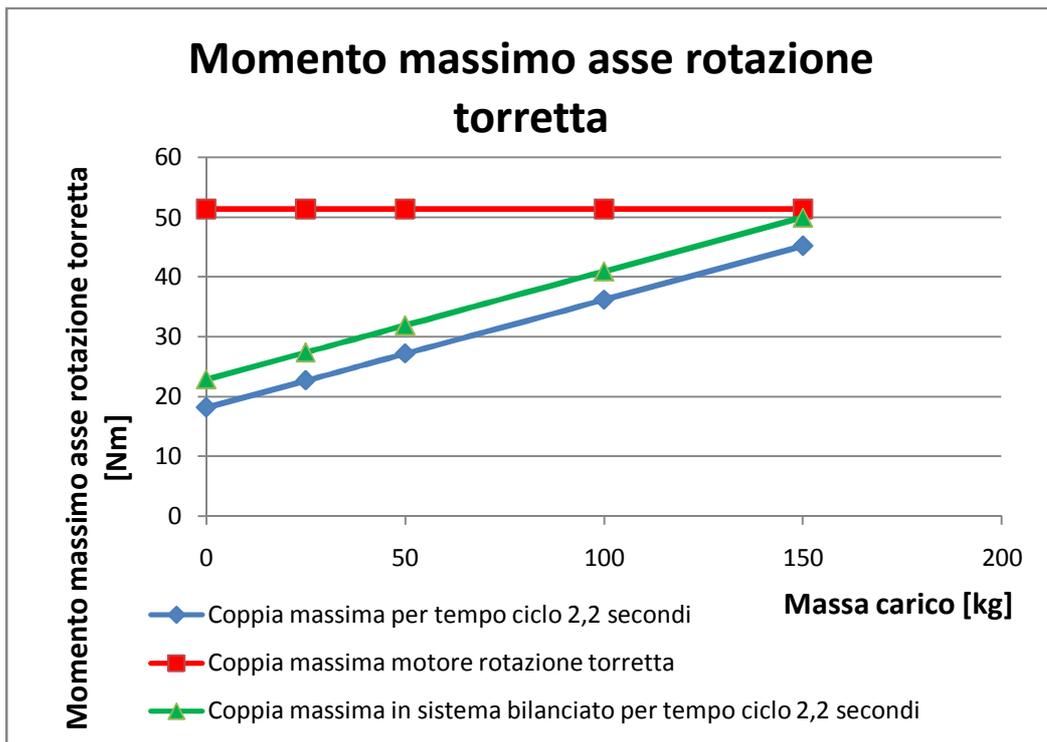


Figura 8.8: grafico delle coppie massime all'asse di rotazione della torretta.

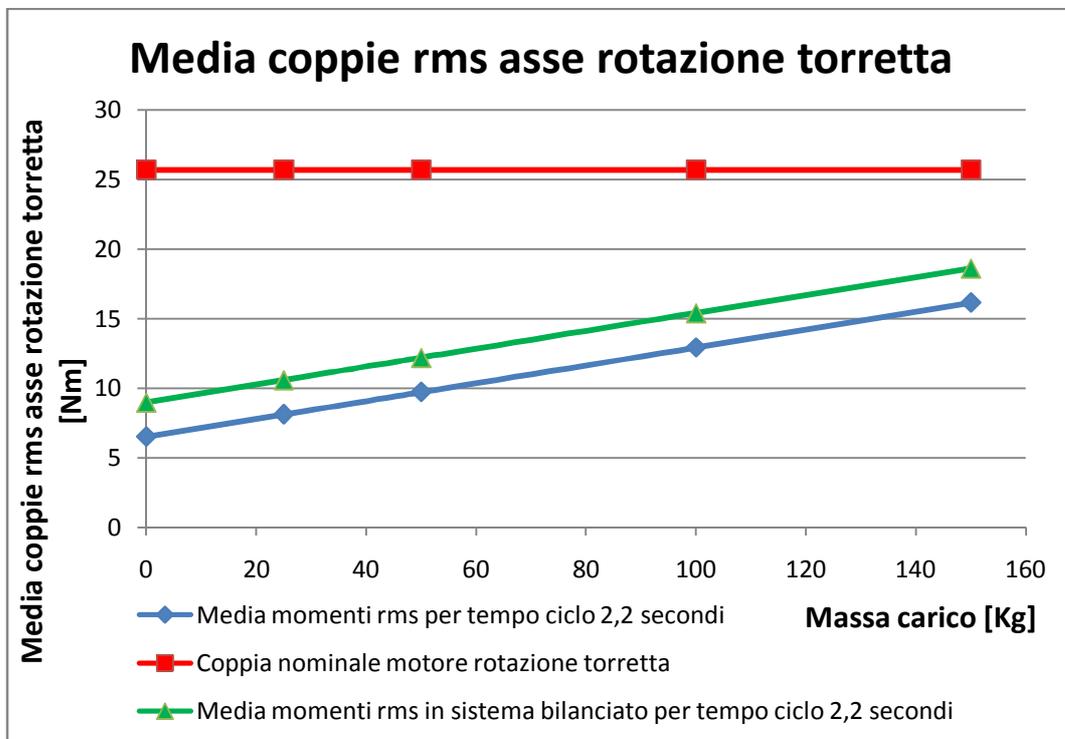


Figura 8.9: grafico delle medie delle coppie rms all'asse di rotazione della torretta.

## 8.5 Bilanciamento con molle

Per poter annullare la variazione di energia potenziale, anche in questo tipo di bilanciamento bisogna porre uguale a zero quello che è all'interno della parentesi delle due equazioni:

$$\begin{cases} \frac{\partial V_{gTot}}{\partial \alpha} = 0 = g * \left( (M_A + M_B + M_E) * h_3 + M_C * h_1 - M_A * h_2 \right) * \cos \alpha \\ \frac{\partial V_{gTot}}{\partial \beta} = 0 = g * \left( M_A * (l_2 + l_1 - l_4) + M_B * (l_1 - l_4) + M_D * l_3 - M_E * l_4 \right) * \cos \beta \end{cases} \quad (8.28)$$

Per ottenere il risultato desiderato si è scelto di inserire due molle.

La prima presenta gli estremi collegati ai punti H e L ed è caratterizzata dal coefficiente elastico  $k_1$ . Come si può notare in figura 8.3, il punto H è solidale alla guida prismatica verticale ad una altezza pari a  $f_1$ . Si è preferito utilizzare il punto L rispetto ad un qualsiasi altro punto del membro B per evitare che si creassero degli inevitabili ulteriori momenti flettenti alla leva.

La seconda molla presenta gli estremi collegati ai punti N e C ed è caratterizzata dal coefficiente elastico  $k_2$ . Il punto N è solidale alla guida prismatica orizzontale ed è ad una altezza pari a  $f_2$ .

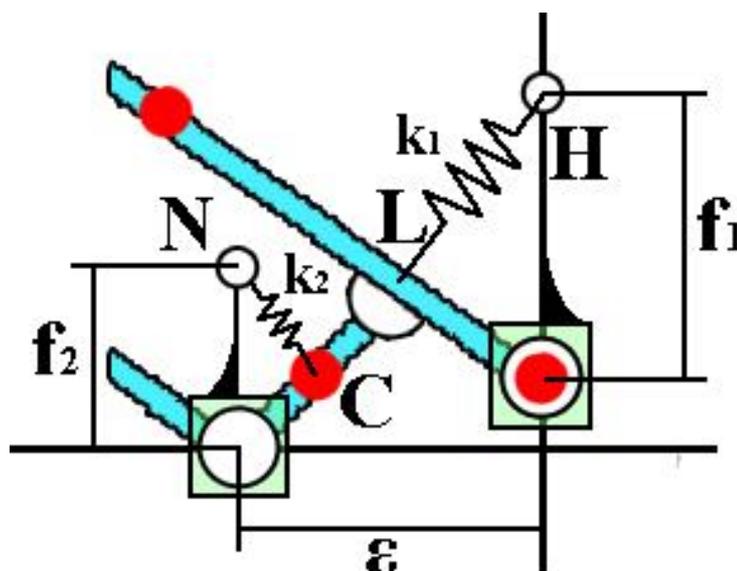


Figura 8.10: bilanciamento statico con molle.

Bisogna tenere presente che il metodo teorico prevedere l'uso di molle con lunghezza libera nulla. Questo non avviene di solito nelle molle commerciali. Applicando appositi precarichi è possibile far conciliare il metodo teorico con la realtà.

L'energia elastica della molla  $k_1$  è:

$$V_{k1} = \frac{1}{2} * k_1 * (\vec{r}_L - \vec{r}_H)^2 \quad (8.29)$$

Dove  $\vec{r}_L$  e  $\vec{r}_H$  sono rispettivamente i vettori posizione di L e H. Le componenti orizzontali e verticali di quest'ultime sono:

$$x_L = l_4 * \cos \beta \quad (8.30)$$

$$y_L = h_3 * \sin \alpha \quad (8.31)$$

$$x_H = \emptyset \quad (8.32)$$

$$y_H = h_3 * \sin \alpha - l_4 * \sin \beta + f_1 \quad (8.33)$$

Risulta:

$$\vec{r}_L - \vec{r}_H = (l_4 * \cos \beta - \emptyset; h_3 * \sin \alpha - h_3 * \sin \alpha + l_4 * \sin \beta - f_1) = (l_4 * \cos \beta; l_4 * \sin \beta - f_1) \quad (8.34)$$

L'energia elastica della molla  $k_1$  è:

$$V_{k1} = \frac{1}{2} * k_1 * (l_4^2 * \cos^2 \beta + l_4^2 * \sin^2 \beta + f_1^2 - 2 * f_1 * l_4 * \sin \beta) = \frac{1}{2} * k_1 * (l_4^2 + f_1^2 - 2 * f_1 * l_4 * \sin \beta) \quad (8.35)$$

Derivando rispetto agli angoli ad  $\alpha$  e  $\beta$ , si ottiene:

$$\frac{\partial V_{k1}}{\partial \alpha} = \emptyset \quad (8.36)$$

$$\frac{\partial V_{k1}}{\partial \beta} = -k_1 * f_1 * l_4 * \cos \beta \quad (8.37)$$

L'energia elastica della molla  $k_2$  è:

$$V_{k2} = \frac{1}{2} * k_2 * (\vec{r}_C - \vec{r}_N)^2 \quad (8.38)$$

Dove  $\vec{r}_N$  e  $\vec{r}_C$  sono rispettivamente i vettori posizione di N e C. Le componenti orizzontali e verticali di quest'ultime sono:

$$x_N = \varepsilon \quad (8.39)$$

$$y_N = f_2 \quad (8.40)$$

$$x_C = \varepsilon - h_1 * \cos \alpha \quad (8.41)$$

$$y_C = h_1 * \sin \alpha \quad (8.42)$$

Risulta:

$$\begin{aligned} \vec{r}_C - \vec{r}_N &= (\varepsilon - h_1 * \cos \alpha - \varepsilon; h_1 * \sin \alpha - f_2) \\ &= (-h_1 * \cos \alpha; h_1 * \sin \alpha - f_2) \end{aligned} \quad (8.43)$$

L'energia elastica della molla  $k_2$  è:

$$\begin{aligned} V_{k2} &= \frac{1}{2} * k_2 \\ &\quad * (h_1^2 * \cos^2 \alpha + h_1^2 \\ &\quad * \sin^2 \alpha + f_2^2 - 2 \\ &\quad * f_2 * h_1 * \sin \alpha) \\ &= \frac{1}{2} * k_2 * (h_1^2 + f_2^2 \\ &\quad - 2 * f_2 * h_1 * \sin \alpha) \end{aligned} \quad (8.44)$$

Derivando rispetto agli angoli ad  $\alpha$  e  $\beta$ , si ottiene:

$$\frac{\partial V_{k2}}{\partial \alpha} = -k_2 * f_2 * h_1 * \cos \alpha \quad (8.45)$$

$$\frac{\partial V_{k2}}{\partial \beta} = \emptyset \quad (8.46)$$

Riscrivendo le derivate parziali dell'energia potenziale dell'intero sistema rispetto alle due variabili indipendenti, si ottiene:

$$\begin{cases} \frac{\partial V_{gTot}}{\partial \alpha} = 0 = g * \left( (M_A + M_B + M_E) * h_3 + M_C * h_1 - M_A * h_2 - k_2 * f_2 * h_1 \right) * \cos \alpha \\ \frac{\partial V_{gTot}}{\partial \beta} = 0 = g * \left( M_A * (l_2 + l_1 - l_4) + M_B * (l_1 - l_4) + M_D * l_3 - M_E * l_4 - k_1 * f_1 * l_4 \right) * \cos \beta \end{cases} \quad (8.47)$$

Uguagliando a zero le due parentesi e ponendo  $f_1 = 0,2 \text{ m}$  e  $f_2 = 0,15 \text{ m}$ , si ottengono i due valori di  $k_1$  e  $k_2$ :

$$\left( (M_A + M_B + M_E) * h_3 + M_C * h_1 - M_A * h_2 - k_2 * f_2 * h_1 \right) = 0 \quad (8.48)$$

$$\left( M_A * (l_2 + l_1 - l_4) + M_B * (l_1 - l_4) + M_D * l_3 - M_E * l_4 - k_1 * f_1 * l_4 \right) = 0 \quad (8.49)$$

Da cui:

$$\begin{aligned} k_2 &= \frac{(M_A + M_B + M_E) * h_3 + M_C * h_1 - M_A * h_2}{f_2 * h_1} \\ &= \frac{(60 + 120 + 40) * 0,3 + 30 * (0,15) - 60 * (0,8)}{0,15 * 0,15} \\ &= 1000 \text{ N/m} \end{aligned} \quad (8.50)$$

$$\begin{aligned} k_1 &= \frac{M_A * (l_2 + l_1 - l_4) + M_B * (l_1 - l_4) + M_D * l_3 - M_E * l_4}{f_1 * l_4} \\ &= \frac{60 * (0,8 + 0,7 - 0,25) + 120 * (0,7 - 0,25) + 100 * (0,625) - 40 * (0,25)}{0,2 * 0,25} \\ &= 3630 \text{ N/m} \end{aligned} \quad (8.51)$$

## 8.6 Considerazioni finali

Nei paragrafi precedenti sono stati proposti i conti iniziali per poter introdurre masse o molle all'interno del sistema con l'obiettivo di bilanciare staticamente il robot. Per poter convalidare e attuare le soluzioni presentate, è necessario verificare dinamicamente e costruttivamente entrambe le strade.

La metodologia di bilanciamento statico con masse presenta alcuni interessanti vantaggi:

- garantendo l'immobilità del centro di massa, si ottiene contestualmente anche una compensazione della shaking force (è una delle due condizioni per bilanciare dinamicamente);
- il bilanciamento statico è assicurato per ogni possibile direzione del campo gravitazionale, nel senso che il meccanismo potrà essere posizionato con un orientamento arbitrario rispetto al piano orizzontale.

Tuttavia, questo approccio si accompagna ad alcune rilevanti problematiche:

- i contrappesi incrementano la massa totale e l'ingombro del meccanismo. Questo potrebbe portare dei problemi anche di installazione sulla linea;
- l'incremento di massa potrebbe generare una crescita delle azioni inerziali, con conseguente aumento della potenza richiesta agli attuatori (il che potrebbe portare ad un incremento della taglia dei motori, limitando quindi uno dei più rilevanti benefici correlati al bilanciamento);
- in presenza di una variazione del carico pagante, rispetto al valore nominale di progetto, il bilanciamento statico non è più garantito, e torna ad essere necessaria l'applicazione di azioni esterne (esercitate dai motori o dai freni di sicurezza) al fine di garantire lo stazionamento del meccanismo.

La metodologia di bilanciamento statico con molle presenta i seguenti svantaggi:

- la compensazione elastica non elimina la shaking force, in quanto non viene garantita la stazionarietà del centro di massa globale;

- il bilanciamento statico ottenuto è efficace soltanto per un unico orientamento del campo gravitazionale: ciò implica che il meccanismo possa essere posizionato, in fase di messa in opera, solo con un orientamento coincidente con quello di progetto.

Tuttavia, nonostante tali limitazioni, questo tipo di approccio presenta comunque alcune interessanti peculiarità:

- l'incremento di massa ed inerzia dovuto all'introduzione delle molle è generalmente trascurabile;
- è attesa una riduzione delle azioni motrici richieste agli attuatori, sebbene tale vantaggio potrebbe essere accompagnato da un incremento delle reazioni vincolari a telaio, a causa delle azioni addizionali esercitate dalle molle sui membri;
- una variazione del carico pagante (purché di entità contenuta) si traduce in una variazione della posizione di equilibrio, non andando ad inficiare l'efficacia del bilanciamento statico.

Con le verifiche dinamiche effettuate per il bilanciamento con masse, si può affermare che, in questo caso, la riduzione di carico tramite l'eliminazione dei carichi statici è più influente delle maggiori inerzie createsi. Questo porta ad affermare che la strada del bilanciamento con masse, e presumibilmente anche quello con molle, è una strategia vantaggiosa al fine di ridurre le potenze elettriche dei motori.

Sarebbe interessante effettuare lo studio di bilanciamento statico attraverso una soluzione ibrida di masse e molle. La soluzione progettuale risulterebbe più complessa, ma consentirebbe un dimensionamento più conveniente dei singoli elementi.

Tutte le valutazioni riportate le considero come oggetto di studio per sviluppi futuri.

## Conclusioni

Questo elaborato è nato con l'intenzione di rispondere a due esigenze aziendali ben precise: la verifica degli azionamenti elettrici installati sul robot "Antrop" e la ricerca di un sistema per ridurre i carichi elettrici su di essi. Le richieste sorgono dalla necessità di rimanere competitivi in un mercato industriale aperto e redditizio.

Il programma realizzato in Matlab è da considerare un'ottima base su cui sperimentare il robot attuale ed eventuali sviluppi futuri. L'utilizzo di metodi classici per l'analisi cinematica e dinamica rende il codice facilmente comprensibile e adattabile ad ogni modifica strutturale o relativa agli azionamenti elettrici. L'algoritmo che forma la mappatura è un punto cruciale della tesi: solo provando a combinare le movimentazioni si può conoscere i carichi massimi che i motori devono erogare. Infine, la proposta di ottimizzazione tramite il bilanciamento statico si può considerare una strada idonea per ridurre i carichi elettrici. Si può quindi affermare che:

- Attraverso la mappatura è stata data una risposta alla richiesta di verifica degli attuali attuatori. Oltre ad un carico di 100 Kg il robot presenta delle difficoltà nella movimentazione, in primis, all'azionamento orizzontale. Per carichi superiori a questa soglia il robot è costretto o a rallentare o a bloccarsi.
- Attraverso il bilanciamento statico è stata data una risposta alla richiesta di ottimizzazione e di riduzione dei carichi elettrici. Seppur ancora in fase teorica, i risultati ottenuti fanno intuire come questa proposta possa portare ad ottimi miglioramenti.

Gli sviluppi futuri che sono stati pensati riguardano principalmente tre fronti. Il primo, come già accennato in precedenza, è quello di analizzare elastodinamicamente il manipolatore "Antrop" attraverso un software commerciale. Preme spingere su questa direzione per avere un modello su cui studiare le oscillazioni che si creano inevitabilmente durante il

ciclo di pallettizzazione del robot. Un controllo accurato di questo aspetto permetterebbe di modificare la morfologia e il materiale delle leve, garantendone la precisione e l'affidabilità della macchina.

Un strada assai gettonata all'interno dell'azienda Paglierani S.r.l. è la modifica del materiale di alcune leve pesanti da acciaio ad alluminio.

Il secondo riguarda il proseguo degli studi fatti sul bilanciamento statico con masse o molle. E' necessaria una progettazione accurata degli elementi bilancianti dal punto di vista costruttivo. Inoltre sarebbe interessante analizzare anche altre configurazioni di masse e molle bilancianti, sempre con l'obiettivo di ottimizzare i carichi elettrici sui motori.

Il terzo fronte riguarda lo studio di bilanciamento statico attraverso una soluzione ibrida con masse e molle. La soluzione progettuale risulterebbe più complessa, ma consentirebbe un dimensionamento più conveniente dei singoli elementi.

Tutte le proposte di sviluppo dovrebbero essere valutate, oltre che dal punto di vista prestazionale, anche dal punto di vista economico.

## Appendice A

### SCRIPT MATLAB RELATIVO ALL'ANALISI CINEMATICA NEL PIANO (X,Y)

```
%% Angoli membri noti
epsilon=(50*pi)/180;
delta=(40*pi)/180;
eta=(44.51*pi)/180;

dec=4; % decimali utili

%% Lunghezze membri telaio
z0=828.76;
z00=722;
z3=216;
z5=229;

%% Lunghezza membri mobili
z4=250;
z6=300;
z7=170;
z8=1250;
z9=z8;
z10=z9;
z11=z6;
z12=170;
z13=262;
z14=200;
z15=1500;
z16=1500;
z17=z14;
z18=693.78;
z19=sqrt((z17^2)+(z18^2)-(2*z17*z18.*cos(eta)));
z24=z3/2;
z25=z5/2;
ro=asin((z17/z19(1,1)).*sin(eta));

%% -----CALCOLO-----
% Membri variabili
z1min=0;
z1max=100;
z2min=0;
z2max=200;
```

```

tempo_campionamento=tempo_ciclo/campionamento;
tempo=linspace(0,tempo_ciclo,campionamento+1);

%% Posizione giunti e membri
for i=1:campionamento+1
    Phi0(i,1)=119.81*pi/180;
    Phi00(i,1)=270.4*pi/180;
    Phi1(i,1)=pi/2;
    Phi2(i,1)=0;
    Phi3(i,1)=0;
    Phi5(i,1)=270*pi/180;

    z0x(i,1)=z0*cos(Phi0(i,1));
    z0y(i,1)=z0*sin(Phi0(i,1));

    z00x(i,1)=z00*cos(Phi00(i,1));
    z00y(i,1)=z00*sin(Phi00(i,1));

    z1x(i,1)=0;
    z1y(i,1)=z1(i,1);

    z2x(i,1)=z2(i,1);
    z2y(i,1)=0;

    z3x(i,1)=z3*cos(Phi3(i,1));
    z3y(i,1)=z3*sin(Phi3(i,1));

    z5x(i,1)=z5*cos(Phi5(i,1));
    z5y(i,1)=z5*sin(Phi5(i,1));

    wx(i,1)=(z2x(i,1)-z3x(i,1)-z0x(i,1)-z00x(i,1));
    wy(i,1)=-z00y(i,1)-z1y(i,1)-z5y(i,1)-z0y(i,1);
    w(i,1)=sqrt((wx(i,1)^2)+(wy(i,1)^2));
    Phiw(i,1)=atan(wy(i,1)/wx(i,1));

    beta(i,1)=acos(((z6)^2)+((w(i,1))^2)-
((z4)^2))/(2*z6*w(i,1));
    gamma(i,1)=acos(((z6)^2)+((z4)^2)-
((w(i,1))^2))/(2*z6*z4);
    alfa(i,1)=pi-beta(i,1)-gamma(i,1);

    Phi4(i,1)=+alfa(i,1)+Phiw(i,1);
    Phi6(i,1)=pi+Phi4(i,1)+gamma(i,1);
    Phi7(i,1)=(316.5*pi)/180;
    Phi8(i,1)=Phi4(i,1)+pi;
    Phi9(i,1)=Phi8(i,1);
    Phi10(i,1)=Phi4(i,1);
    Phi11(i,1)=Phi6(i,1)-pi;
    Phi12(i,1)=Phi7(i,1)-pi;
    Phi13(i,1)=Phi12(i,1)-pi+epsilon;
    Phi14(i,1)=Phi13(i,1)-pi+delta;
    Phi15(i,1)=Phi6(i,1);

```

```

Phi16(i,1)=Phi11(i,1);
Phi17(i,1)=Phi14(i,1)+pi;
Phi18(i,1)=Phi17(i,1)+pi+eta;
Phi19(i,1)=Phi18(i,1)-pi+ro;
Phi20(i,1)=Phi11(i,1);
Phi21(i,1)=Phi8(i,1);
Phi22(i,1)=Phi11(i,1);
Phi23(i,1)=Phi10(i,1);
Phi24(i,1)=Phi3(i,1)-pi;
Phi25(i,1)=Phi5(i,1);

z4x(i,1)=z4*cos(Phi4(i,1));
z4y(i,1)=z4*sin(Phi4(i,1));

z6x(i,1)=z6*cos(Phi6(i,1));
z6y(i,1)=z6*sin(Phi6(i,1));

z7x(i,1)=z7*cos(Phi7(i,1));
z7y(i,1)=z7*sin(Phi7(i,1));

z8x(i,1)=z8*cos(Phi8(i,1));
z8y(i,1)=z8*sin(Phi8(i,1));

z9x(i,1)=z9*cos(Phi9(i,1));
z9y(i,1)=z9*sin(Phi9(i,1));

z10x(i,1)=z10*cos(Phi10(i,1));
z10y(i,1)=z10*sin(Phi10(i,1));

z11x(i,1)=z11*cos(Phi11(i,1));
z11y(i,1)=z11*sin(Phi11(i,1));

z12x(i,1)=z12*cos(Phi12(i,1));
z12y(i,1)=z12*sin(Phi12(i,1));

z13x(i,1)=z13*cos(Phi13(i,1));
z13y(i,1)=z13*sin(Phi13(i,1));

z14x(i,1)=z14*cos(Phi14(i,1));
z14y(i,1)=z14*sin(Phi14(i,1));

z15x(i,1)=z15*cos(Phi15(i,1));
z15y(i,1)=z15*sin(Phi15(i,1));

z16x(i,1)=z16*cos(Phi16(i,1));
z16y(i,1)=z16*sin(Phi16(i,1));

z17x(i,1)=z17*cos(Phi17(i,1));
z17y(i,1)=z17*sin(Phi17(i,1));

z18x(i,1)=z18*cos(Phi18(i,1));

```

```

z18y(i,1)=z18*sin(Phi18(i,1));

z19x(i,1)=z19*cos(Phi19(i,1));
z19y(i,1)=z19*sin(Phi19(i,1));

z20x(i,1)=z20*cos(Phi20(i,1));
z20y(i,1)=z20*sin(Phi20(i,1));

z21x(i,1)=z21*cos(Phi21(i,1));
z21y(i,1)=z21*sin(Phi21(i,1));

z22x(i,1)=z22*cos(Phi22(i,1));
z22y(i,1)=z22*sin(Phi22(i,1));

z23x(i,1)=z23*cos(Phi23(i,1));
z23y(i,1)=z23*sin(Phi23(i,1));

z24x(i,1)=z24*cos(Phi24(i,1));
z24y(i,1)=z24*sin(Phi24(i,1));

z25x(i,1)=z25*cos(Phi25(i,1));
z25y(i,1)=z25*sin(Phi25(i,1));

p1x(i,1)=z0x(i,1);
p1y(i,1)=z0y(i,1);

p2x(i,1)=z0x(i,1)+z1x(i,1);
p2y(i,1)=z0y(i,1)+z1y(i,1);

p3x(i,1)=z0x(i,1)+z3x(i,1)+z1x(i,1);
p3y(i,1)=z0y(i,1)+z1y(i,1)+z3y(i,1);

p4x(i,1)=-z00x(i,1);
p4y(i,1)=-z00y(i,1);

p5x(i,1)=-z00x(i,1)+z2x(i,1);
p5y(i,1)=-z00y(i,1)+z2y(i,1);

p6x(i,1)=-z00x(i,1)+z2x(i,1)-z5x(i,1);
p6y(i,1)=-z00y(i,1)+z2y(i,1)-z5y(i,1);

p7x(i,1)=+p3x(i,1)+z4x(i,1);
p7y(i,1)=+p3y(i,1)+z4y(i,1);

p8x(i,1)=+p6x(i,1)-z7x(i,1);
p8y(i,1)=+p6y(i,1)-z7y(i,1);

p9x(i,1)=p7x(i,1)-z8x(i,1);
p9y(i,1)=p7y(i,1)-z8y(i,1);

p10x(i,1)=+p8x(i,1)-z9x(i,1);
p10y(i,1)=+p8y(i,1)-z9y(i,1);

```

```

p11x(i,1)=+p6x(i,1)+z10x(i,1);
p11y(i,1)=+p6y(i,1)+z10y(i,1);

p12x(i,1)=+p11x(i,1)-z14x(i,1);
p12y(i,1)=+p11y(i,1)-z14y(i,1);

p13x(i,1)=+p12x(i,1)-z16x(i,1);
p13y(i,1)=+p12y(i,1)-z16y(i,1);

p14x(i,1)=+p11x(i,1)+z15x(i,1);
p14y(i,1)=+p11y(i,1)+z15y(i,1);

p15x(i,1)=p14x(i,1)-z19x(i,1);
p15y(i,1)=p14y(i,1)-z19y(i,1);

p16x(i,1)=p14x(i,1)+z20x(i,1);
p16y(i,1)=p14y(i,1)+z20y(i,1);

p17x(i,1)=p9x(i,1)+z21x(i,1);
p17y(i,1)=p9y(i,1)+z21y(i,1);

p18x(i,1)=p6x(i,1)+z22x(i,1);
p18y(i,1)=p6y(i,1)+z22y(i,1);

p19x(i,1)=p6x(i,1)+z23x(i,1);
p19y(i,1)=p6y(i,1)+z23y(i,1);

p20x(i,1)=p3x(i,1)+z24x(i,1);
p20y(i,1)=p3y(i,1)+z24y(i,1);

p21x(i,1)=p6x(i,1)+z25x(i,1);
p21y(i,1)=p6y(i,1)+z25y(i,1);
end

p1=[p1x,p1y];
p2=[p2x,p2y];
p3=[p3x,p3y];
p4=[p4x,p4y];
p5=[p5x,p5y];
p6=[p6x,p6y];
p7=[p7x,p7y];
p8=[p8x,p8y];
p9=[p9x,p9y];
p10=[p10x,p10y];
p11=[p11x,p11y];
p12=[p12x,p12y];
p13=[p13x,p13y];
p14=[p14x,p14y];
p15=[p15x,p15y];
p16=[p16x,p16y];
p17=[p17x,p17y];

```

```

p18=[p18x,p18y];
p19=[p19x,p19y];
p20=[p20x,p20y];
p21=[p21x,p21y];

%% Velocità angolare membri
for j=1:campionamento
    t=tempo_campionamento;
    Omega4(j,1)=(Phi4(j+1,1)-Phi4(j,1))/t;
    Omega6(j,1)=(Phi6(j+1,1)-Phi6(j,1))/t;
    Omega8(j,1)=(Phi8(j+1,1)-Phi8(j,1))/t;
    Omega9(j,1)=(Phi9(j+1,1)-Phi9(j,1))/t;
    Omega10(j,1)=(Phi10(j+1,1)-Phi10(j,1))/t;
    Omega11(j,1)=(Phi11(j+1,1)-Phi11(j,1))/t;
    Omega12(j,1)=(Phi12(j+1,1)-Phi12(j,1))/t;
    Omega13(j,1)=(Phi13(j+1,1)-Phi13(j,1))/t;
    Omega14(j,1)=(Phi14(j+1,1)-Phi14(j,1))/t;
    Omega15(j,1)=(Phi15(j+1,1)-Phi15(j,1))/t;
    Omega16(j,1)=(Phi16(j+1,1)-Phi16(j,1))/t;
    Omega17(j,1)=(Phi17(j+1,1)-Phi17(j,1))/t;
    Omega18(j,1)=(Phi18(j+1,1)-Phi18(j,1))/t;
    Omega19(j,1)=(Phi19(j+1,1)-Phi19(j,1))/t;
end

Omega4(campionamento+1,1)=2*Omega4(campionamento,1)-
Omega4(campionamento-1,1);
Omega6(campionamento+1,1)=2*Omega6(campionamento,1)-
Omega6(campionamento-1,1);
Omega8(campionamento+1,1)=2*Omega8(campionamento,1)-
Omega8(campionamento-1,1);
Omega9(campionamento+1,1)=2*Omega9(campionamento,1)-
Omega9(campionamento-1,1);
Omega10(campionamento+1,1)=2*Omega10(campionamento,1)-
Omega10(campionamento-1,1);
Omega11(campionamento+1,1)=2*Omega11(campionamento,1)-
Omega11(campionamento-1,1);
Omega12(campionamento+1,1)=2*Omega12(campionamento,1)-
Omega12(campionamento-1,1);
Omega13(campionamento+1,1)=2*Omega13(campionamento,1)-
Omega13(campionamento-1,1);
Omega14(campionamento+1,1)=2*Omega14(campionamento,1)-
Omega14(campionamento-1,1);
Omega15(campionamento+1,1)=2*Omega15(campionamento,1)-
Omega15(campionamento-1,1);
Omega16(campionamento+1,1)=2*Omega16(campionamento,1)-
Omega16(campionamento-1,1);
Omega17(campionamento+1,1)=2*Omega17(campionamento,1)-
Omega17(campionamento-1,1);
Omega18(campionamento+1,1)=2*Omega18(campionamento,1)-
Omega18(campionamento-1,1);
Omega19(campionamento+1,1)=2*Omega19(campionamento,1)-
Omega19(campionamento-1,1);

```

```

%% Accelerazione angolare membri

for j=1:campionamento
    t=tempo_campionamento;
    deltaOmega4(j,1)=(Omega4(j+1,1)-Omega4(j,1))/t;
    deltaOmega6(j,1)=(Omega6(j+1,1)-Omega6(j,1))/t;
    deltaOmega8(j,1)=(Omega8(j+1,1)-Omega8(j,1))/t;
    deltaOmega9(j,1)=(Omega9(j+1,1)-Omega9(j,1))/t;
    deltaOmega10(j,1)=(Omega10(j+1,1)-Omega10(j,1))/t;
    deltaOmega11(j,1)=(Omega11(j+1,1)-Omega11(j,1))/t;
    deltaOmega12(j,1)=(Omega12(j+1,1)-Omega12(j,1))/t;
    deltaOmega13(j,1)=(Omega13(j+1,1)-Omega13(j,1))/t;
    deltaOmega14(j,1)=(Omega14(j+1,1)-Omega14(j,1))/t;
    deltaOmega15(j,1)=(Omega15(j+1,1)-Omega15(j,1))/t;
    deltaOmega16(j,1)=(Omega16(j+1,1)-Omega16(j,1))/t;
    deltaOmega17(j,1)=(Omega17(j+1,1)-Omega17(j,1))/t;
    deltaOmega18(j,1)=(Omega18(j+1,1)-Omega18(j,1))/t;
    deltaOmega19(j,1)=(Omega19(j+1,1)-Omega19(j,1))/t;
end

deltaOmega4(campionamento+1,1)=2*deltaOmega4(campionamento,1)
-deltaOmega4(campionamento-1,1);
deltaOmega6(campionamento+1,1)=2*deltaOmega6(campionamento,1)
-deltaOmega6(campionamento-1,1);
deltaOmega8(campionamento+1,1)=2*deltaOmega8(campionamento,1)
-deltaOmega8(campionamento-1,1);
deltaOmega9(campionamento+1,1)=2*deltaOmega9(campionamento,1)
-deltaOmega9(campionamento-1,1);
deltaOmega10(campionamento+1,1)=2*deltaOmega10(campionamento,
1)-deltaOmega10(campionamento-1,1);
deltaOmega11(campionamento+1,1)=2*deltaOmega11(campionamento,
1)-deltaOmega11(campionamento-1,1);
deltaOmega12(campionamento+1,1)=2*deltaOmega12(campionamento,
1)-deltaOmega12(campionamento-1,1);
deltaOmega13(campionamento+1,1)=2*deltaOmega13(campionamento,
1)-deltaOmega13(campionamento-1,1);
deltaOmega14(campionamento+1,1)=2*deltaOmega14(campionamento,
1)-deltaOmega14(campionamento-1,1);
deltaOmega15(campionamento+1,1)=2*deltaOmega15(campionamento,
1)-deltaOmega15(campionamento-1,1);
deltaOmega16(campionamento+1,1)=2*deltaOmega16(campionamento,
1)-deltaOmega16(campionamento-1,1);
deltaOmega17(campionamento+1,1)=2*deltaOmega17(campionamento,
1)-deltaOmega17(campionamento-1,1);
deltaOmega18(campionamento+1,1)=2*deltaOmega18(campionamento,
1)-deltaOmega18(campionamento-1,1);
deltaOmega19(campionamento+1,1)=2*deltaOmega19(campionamento,
1)-deltaOmega19(campionamento-1,1);

%% Velocità giunti

```

```

for j=1:campionamento
    t=tempo_campionamento;
    v2x(j,1)=(p2(j+1,1)-p2(j,1))/t;
    v2y(j,1)=(p2(j+1,2)-p2(j,2))/t;
    v3x(j,1)=(p3(j+1,1)-p3(j,1))/t;
    v3y(j,1)=(p3(j+1,2)-p3(j,2))/t;
    v5x(j,1)=(p5(j+1,1)-p5(j,1))/t;
    v5y(j,1)=(p5(j+1,2)-p5(j,2))/t;
    v6x(j,1)=(p6(j+1,1)-p6(j,1))/t;
    v6y(j,1)=(p6(j+1,2)-p6(j,2))/t;
    v7x(j,1)=(p7(j+1,1)-p7(j,1))/t;
    v7y(j,1)=(p7(j+1,2)-p7(j,2))/t;
    v8x(j,1)=(p8(j+1,1)-p8(j,1))/t;
    v8y(j,1)=(p8(j+1,2)-p8(j,2))/t;
    v9x(j,1)=(p9(j+1,1)-p9(j,1))/t;
    v9y(j,1)=(p9(j+1,2)-p9(j,2))/t;
    v10x(j,1)=(p10(j+1,1)-p10(j,1))/t;
    v10y(j,1)=(p10(j+1,2)-p10(j,2))/t;
    v11x(j,1)=(p11(j+1,1)-p11(j,1))/t;
    v11y(j,1)=(p11(j+1,2)-p11(j,2))/t;
    v12x(j,1)=(p12(j+1,1)-p12(j,1))/t;
    v12y(j,1)=(p12(j+1,2)-p12(j,2))/t;
    v13x(j,1)=(p13(j+1,1)-p13(j,1))/t;
    v13y(j,1)=(p13(j+1,2)-p13(j,2))/t;
    v14x(j,1)=(p14(j+1,1)-p14(j,1))/t;
    v14y(j,1)=(p14(j+1,2)-p14(j,2))/t;
    v15x(j,1)=(p15(j+1,1)-p15(j,1))/t;
    v15y(j,1)=(p15(j+1,2)-p15(j,2))/t;
    v16x(j,1)=(p16(j+1,1)-p16(j,1))/t;
    v16y(j,1)=(p16(j+1,2)-p16(j,2))/t;
    v17x(j,1)=(p17(j+1,1)-p17(j,1))/t;
    v17y(j,1)=(p17(j+1,2)-p17(j,2))/t;
    v18x(j,1)=(p18(j+1,1)-p18(j,1))/t;
    v18y(j,1)=(p18(j+1,2)-p18(j,2))/t;
    v19x(j,1)=(p19(j+1,1)-p19(j,1))/t;
    v19y(j,1)=(p19(j+1,2)-p19(j,2))/t;
    v20x(j,1)=(p20(j+1,1)-p20(j,1))/t;
    v20y(j,1)=(p20(j+1,2)-p20(j,2))/t;
    v21x(j,1)=(p21(j+1,1)-p21(j,1))/t;
    v21y(j,1)=(p21(j+1,2)-p21(j,2))/t;
end

v2x(campionamento+1,1)=2*v2x(campionamento,1)-
v2x(campionamento-1,1);
v2y(campionamento+1,1)=2*v2y(campionamento,1)-
v2y(campionamento-1,1);
v3x(campionamento+1,1)=2*v3x(campionamento,1)-
v3x(campionamento-1,1);
v3y(campionamento+1,1)=2*v3y(campionamento,1)-
v3y(campionamento-1,1);
v5x(campionamento+1,1)=2*v5x(campionamento,1)-
v5x(campionamento-1,1);

```

$v5y(\text{campionamento}+1,1)=2*v5y(\text{campionamento},1)-v5y(\text{campionamento}-1,1);$   
 $v6x(\text{campionamento}+1,1)=2*v6x(\text{campionamento},1)-v6x(\text{campionamento}-1,1);$   
 $v6y(\text{campionamento}+1,1)=2*v6y(\text{campionamento},1)-v6y(\text{campionamento}-1,1);$   
 $v7x(\text{campionamento}+1,1)=2*v7x(\text{campionamento},1)-v7x(\text{campionamento}-1,1);$   
 $v7y(\text{campionamento}+1,1)=2*v7y(\text{campionamento},1)-v7y(\text{campionamento}-1,1);$   
 $v8x(\text{campionamento}+1,1)=2*v8x(\text{campionamento},1)-v8x(\text{campionamento}-1,1);$   
 $v8y(\text{campionamento}+1,1)=2*v8y(\text{campionamento},1)-v8y(\text{campionamento}-1,1);$   
 $v9x(\text{campionamento}+1,1)=2*v9x(\text{campionamento},1)-v9x(\text{campionamento}-1,1);$   
 $v9y(\text{campionamento}+1,1)=2*v9y(\text{campionamento},1)-v9y(\text{campionamento}-1,1);$   
 $v10x(\text{campionamento}+1,1)=2*v10x(\text{campionamento},1)-v10x(\text{campionamento}-1,1);$   
 $v10y(\text{campionamento}+1,1)=2*v10y(\text{campionamento},1)-v10y(\text{campionamento}-1,1);$   
 $v11x(\text{campionamento}+1,1)=2*v11x(\text{campionamento},1)-v11x(\text{campionamento}-1,1);$   
 $v11y(\text{campionamento}+1,1)=2*v11y(\text{campionamento},1)-v11y(\text{campionamento}-1,1);$   
 $v12x(\text{campionamento}+1,1)=2*v12x(\text{campionamento},1)-v12x(\text{campionamento}-1,1);$   
 $v12y(\text{campionamento}+1,1)=2*v12y(\text{campionamento},1)-v12y(\text{campionamento}-1,1);$   
 $v13x(\text{campionamento}+1,1)=2*v13x(\text{campionamento},1)-v13x(\text{campionamento}-1,1);$   
 $v13y(\text{campionamento}+1,1)=2*v13y(\text{campionamento},1)-v13y(\text{campionamento}-1,1);$   
 $v14x(\text{campionamento}+1,1)=2*v14x(\text{campionamento},1)-v14x(\text{campionamento}-1,1);$   
 $v14y(\text{campionamento}+1,1)=2*v14y(\text{campionamento},1)-v14y(\text{campionamento}-1,1);$   
 $v15x(\text{campionamento}+1,1)=2*v15x(\text{campionamento},1)-v15x(\text{campionamento}-1,1);$   
 $v15y(\text{campionamento}+1,1)=2*v15y(\text{campionamento},1)-v15y(\text{campionamento}-1,1);$   
 $v16x(\text{campionamento}+1,1)=2*v16x(\text{campionamento},1)-v16x(\text{campionamento}-1,1);$   
 $v16y(\text{campionamento}+1,1)=2*v16y(\text{campionamento},1)-v16y(\text{campionamento}-1,1);$   
 $v17x(\text{campionamento}+1,1)=2*v17x(\text{campionamento},1)-v17x(\text{campionamento}-1,1);$   
 $v17y(\text{campionamento}+1,1)=2*v17y(\text{campionamento},1)-v17y(\text{campionamento}-1,1);$   
 $v18x(\text{campionamento}+1,1)=2*v18x(\text{campionamento},1)-v18x(\text{campionamento}-1,1);$

```

v18y(campionamento+1,1)=2*v18y(campionamento,1)-
v18y(campionamento-1,1);
v19x(campionamento+1,1)=2*v19x(campionamento,1)-
v19x(campionamento-1,1);
v19y(campionamento+1,1)=2*v19y(campionamento,1)-
v19y(campionamento-1,1);
v20x(campionamento+1,1)=2*v20x(campionamento,1)-
v20x(campionamento-1,1);
v20y(campionamento+1,1)=2*v20y(campionamento,1)-
v20y(campionamento-1,1);
v21x(campionamento+1,1)=2*v21x(campionamento,1)-
v21x(campionamento-1,1);
v21y(campionamento+1,1)=2*v21y(campionamento,1)-
v21y(campionamento-1,1);

%% Approssimazione velocità
v2x=(1./(10.^dec)).*sign(v2x).*floor(abs(v2x.*(10.^dec)));
v3x=(1./(10.^dec)).*sign(v3x).*floor(abs(v3x.*(10.^dec)));
v5x=(1./(10.^dec)).*sign(v5x).*floor(abs(v5x.*(10.^dec)));
v6x=(1./(10.^dec)).*sign(v6x).*floor(abs(v6x.*(10.^dec)));
v7x=(1./(10.^dec)).*sign(v7x).*floor(abs(v7x.*(10.^dec)));
v8x=(1./(10.^dec)).*sign(v8x).*floor(abs(v8x.*(10.^dec)));
v9x=(1./(10.^dec)).*sign(v9x).*floor(abs(v9x.*(10.^dec)));
v10x=(1./(10.^dec)).*sign(v10x).*floor(abs(v10x.*(10.^dec)
);
v11x=(1./(10.^dec)).*sign(v11x).*floor(abs(v11x.*(10.^dec)
);
v12x=(1./(10.^dec)).*sign(v12x).*floor(abs(v12x.*(10.^dec)
);
v13x=(1./(10.^dec)).*sign(v13x).*floor(abs(v13x.*(10.^dec)
);
v14x=(1./(10.^dec)).*sign(v14x).*floor(abs(v14x.*(10.^dec)
);
v15x=(1./(10.^dec)).*sign(v15x).*floor(abs(v15x.*(10.^dec)
);
v16x=(1./(10.^dec)).*sign(v16x).*floor(abs(v16x.*(10.^dec)
);
v17x=(1./(10.^dec)).*sign(v17x).*floor(abs(v17x.*(10.^dec)
);
v18x=(1./(10.^dec)).*sign(v18x).*floor(abs(v18x.*(10.^dec)
);
v19x=(1./(10.^dec)).*sign(v19x).*floor(abs(v19x.*(10.^dec)
);
v20x=(1./(10.^dec)).*sign(v20x).*floor(abs(v20x.*(10.^dec)
);
v21x=(1./(10.^dec)).*sign(v21x).*floor(abs(v21x.*(10.^dec)
);

v2y=(1./(10.^dec)).*sign(v2y).*floor(abs(v2y.*(10.^dec)));
v3y=(1./(10.^dec)).*sign(v3y).*floor(abs(v3y.*(10.^dec)));
v5y=(1./(10.^dec)).*sign(v5y).*floor(abs(v5y.*(10.^dec)));
v6y=(1./(10.^dec)).*sign(v6y).*floor(abs(v6y.*(10.^dec)));

```

```

v7y=((1./(10.^dec)).*sign(v7y)).*floor(abs(v7y.*(10.^dec)));
v8y=((1./(10.^dec)).*sign(v8y)).*floor(abs(v8y.*(10.^dec)));
v9y=((1./(10.^dec)).*sign(v9y)).*floor(abs(v9y.*(10.^dec)));
v10y=((1./(10.^dec)).*sign(v10y)).*floor(abs(v10y.*(10.^dec)
);
v11y=((1./(10.^dec)).*sign(v11y)).*floor(abs(v11y.*(10.^dec)
);
v12y=((1./(10.^dec)).*sign(v12y)).*floor(abs(v12y.*(10.^dec)
);
v13y=((1./(10.^dec)).*sign(v13y)).*floor(abs(v13y.*(10.^dec)
);
v14y=((1./(10.^dec)).*sign(v14y)).*floor(abs(v14y.*(10.^dec)
);
v15y=((1./(10.^dec)).*sign(v15y)).*floor(abs(v15y.*(10.^dec)
);
v16y=((1./(10.^dec)).*sign(v16y)).*floor(abs(v16y.*(10.^dec)
);
v17y=((1./(10.^dec)).*sign(v17y)).*floor(abs(v17y.*(10.^dec)
);
v18y=((1./(10.^dec)).*sign(v18y)).*floor(abs(v18y.*(10.^dec)
);
v19y=((1./(10.^dec)).*sign(v19y)).*floor(abs(v19y.*(10.^dec)
);
v20y=((1./(10.^dec)).*sign(v20y)).*floor(abs(v20y.*(10.^dec)
);
v21y=((1./(10.^dec)).*sign(v21y)).*floor(abs(v21y.*(10.^dec)
);

```

```

v2=[v2x,v2y];
v3=[v3x,v3y];
v5=[v5x,v5y];
v6=[v6x,v6y];
v7=[v7x,v7y];
v8=[v8x,v8y];
v9=[v9x,v9y];
v10=[v10x,v10y];
v11=[v11x,v11y];
v12=[v12x,v12y];
v13=[v13x,v13y];
v14=[v14x,v14y];
v15=[v15x,v15y];
v16=[v16x,v16y];
v17=[v17x,v17y];
v18=[v18x,v18y];
v19=[v19x,v19y];
v20=[v20x,v20y];
v21=[v21x,v21y];

```

```

%% Vettori velocità rispetto al sistema di riferimento fisso
for j=1:campionamento+1
    V2(j,1)=p2(j,1);
    V2(j,2)=p2(j,2);

```

```
V2(j,3)=p2(j,1)+v2(j,1);
V2(j,4)=p2(j,2)+v2(j,2);
V2abs(j,1)=sqrt((v2(j,1)^2)+(v2(j,2)^2));
```

```
V3(j,1)=p3(j,1);
V3(j,2)=p3(j,2);
V3(j,3)=p3(j,1)+v3(j,1);
V3(j,4)=p3(j,2)+v3(j,2);
```

```
V5(j,1)=p5(j,1);
V5(j,2)=p5(j,2);
V5(j,3)=p5(j,1)+v5(j,1);
V5(j,4)=p5(j,2)+v5(j,2);
```

```
V6(j,1)=p6(j,1);
V6(j,2)=p6(j,2);
V6(j,3)=p6(j,1)+v6(j,1);
V6(j,4)=p6(j,2)+v6(j,2);
```

```
V7(j,1)=p7(j,1);
V7(j,2)=p7(j,2);
V7(j,3)=p7(j,1)+v7(j,1);
V7(j,4)=p7(j,2)+v7(j,2);
```

```
V8(j,1)=p8(j,1);
V8(j,2)=p8(j,2);
V8(j,3)=p8(j,1)+v8(j,1);
V8(j,4)=p8(j,2)+v8(j,2);
```

```
V9(j,1)=p9(j,1);
V9(j,2)=p9(j,2);
V9(j,3)=p9(j,1)+v9(j,1);
V9(j,4)=p9(j,2)+v9(j,2);
```

```
V10(j,1)=p10(j,1);
V10(j,2)=p10(j,2);
V10(j,3)=p10(j,1)+v10(j,1);
V10(j,4)=p10(j,2)+v10(j,2);
```

```
V11(j,1)=p11(j,1);
V11(j,2)=p11(j,2);
V11(j,4)=p11(j,1)+v11(j,1);
V11(j,5)=p11(j,2)+v11(j,2);
```

```
V12(j,1)=p12(j,1);
V12(j,2)=p12(j,2);
V12(j,3)=p12(j,1)+v12(j,1);
V12(j,4)=p12(j,2)+v12(j,2);
```

```
V13(j,1)=p13(j,1);
V13(j,2)=p13(j,2);
V13(j,3)=p13(j,1)+v13(j,1);
```

```

V13(j,4)=p13(j,2)+v13(j,2);

V14(j,1)=p14(j,1);
V14(j,2)=p14(j,2);
V14(j,3)=p14(j,1)+v14(j,1);
V14(j,4)=p14(j,2)+v14(j,2);

V15(j,1)=p15(j,1);
V15(j,2)=p15(j,2);
V15(j,3)=p15(j,1)+v15(j,1);
V15(j,4)=p15(j,2)+v15(j,2);

V16(j,1)=p16(j,1);
V16(j,2)=p16(j,2);
V16(j,3)=p16(j,1)+v16(j,1);
V16(j,4)=p16(j,2)+v16(j,2);

V17(j,1)=p17(j,1);
V17(j,2)=p17(j,2);
V17(j,3)=p17(j,1)+v17(j,1);
V17(j,4)=p17(j,2)+v17(j,2);

V18(j,1)=p18(j,1);
V18(j,2)=p18(j,2);
V18(j,3)=p18(j,1)+v18(j,1);
V18(j,4)=p18(j,2)+v18(j,2);

V19(j,1)=p19(j,1);
V19(j,2)=p19(j,2);
V19(j,3)=p19(j,1)+v19(j,1);
V19(j,4)=p19(j,2)+v19(j,2);

V20(j,1)=p20(j,1);
V20(j,2)=p20(j,2);
V20(j,3)=p20(j,1)+v20(j,1);
V20(j,4)=p20(j,2)+v20(j,2);

V21(j,1)=p21(j,1);
V21(j,2)=p21(j,2);
V21(j,3)=p21(j,1)+v21(j,1);
V21(j,4)=p21(j,2)+v21(j,2);
end

%% Accelerazioni giunti

for j=1:campionamento
t=tempo_campionamento;
a2x(j,1)=(v2(j+1,1)-v2(j,1))/t;
a2y(j,1)=(v2(j+1,2)-v2(j,2))/t;
a3x(j,1)=(v3(j+1,1)-v3(j,1))/t;
a3y(j,1)=(v3(j+1,2)-v3(j,2))/t;
a5x(j,1)=(v5(j+1,1)-v5(j,1))/t;

```

```

a5y(j,1)=(v5(j+1,2)-v5(j,2))/t;
a6x(j,1)=(v6(j+1,1)-v6(j,1))/t;
a6y(j,1)=(v6(j+1,2)-v6(j,2))/t;
a7x(j,1)=(v7(j+1,1)-v7(j,1))/t;
a7y(j,1)=(v7(j+1,2)-v7(j,2))/t;
a8x(j,1)=(v8(j+1,1)-v8(j,1))/t;
a8y(j,1)=(v8(j+1,2)-v8(j,2))/t;
a9x(j,1)=(v9(j+1,1)-v9(j,1))/t;
a9y(j,1)=(v9(j+1,2)-v9(j,2))/t;
a10x(j,1)=(v10(j+1,1)-v10(j,1))/t;
a10y(j,1)=(v10(j+1,2)-v10(j,2))/t;
a11x(j,1)=(v11(j+1,1)-v11(j,1))/t;
a11y(j,1)=(v11(j+1,2)-v11(j,2))/t;
a12x(j,1)=(v12(j+1,1)-v12(j,1))/t;
a12y(j,1)=(v12(j+1,2)-v12(j,2))/t;
a13x(j,1)=(v13(j+1,1)-v13(j,1))/t;
a13y(j,1)=(v13(j+1,2)-v13(j,2))/t;
a14x(j,1)=(v14(j+1,1)-v14(j,1))/t;
a14y(j,1)=(v14(j+1,2)-v14(j,2))/t;
a15x(j,1)=(v15(j+1,1)-v15(j,1))/t;
a15y(j,1)=(v15(j+1,2)-v15(j,2))/t;
a16x(j,1)=(v16(j+1,1)-v16(j,1))/t;
a16y(j,1)=(v16(j+1,2)-v16(j,2))/t;
a17x(j,1)=(v17(j+1,1)-v17(j,1))/t;
a17y(j,1)=(v17(j+1,2)-v17(j,2))/t;
a18x(j,1)=(v18(j+1,1)-v18(j,1))/t;
a18y(j,1)=(v18(j+1,2)-v18(j,2))/t;
a19x(j,1)=(v19(j+1,1)-v19(j,1))/t;
a19y(j,1)=(v19(j+1,2)-v19(j,2))/t;
a20x(j,1)=(v20(j+1,1)-v20(j,1))/t;
a20y(j,1)=(v20(j+1,2)-v20(j,2))/t;
a21x(j,1)=(v21(j+1,1)-v21(j,1))/t;
a21y(j,1)=(v21(j+1,2)-v21(j,2))/t;

```

end

```

a2x(campionamento+1,1)=2*a2x(campionamento,1)-
a2x(campionamento-1,1);
a2y(campionamento+1,1)=2*a2y(campionamento,1)-
a2y(campionamento-1,1);
a3x(campionamento+1,1)=2*a3x(campionamento,1)-
a3x(campionamento-1,1);
a3y(campionamento+1,1)=2*a3y(campionamento,1)-
a3y(campionamento-1,1);
a5x(campionamento+1,1)=2*a5x(campionamento,1)-
a5x(campionamento-1,1);
a5y(campionamento+1,1)=2*a5y(campionamento,1)-
a5y(campionamento-1,1);
a6x(campionamento+1,1)=2*a6x(campionamento,1)-
a6x(campionamento-1,1);
a6y(campionamento+1,1)=2*a6y(campionamento,1)-
a6y(campionamento-1,1);

```

$a7x(\text{campionamento}+1,1)=2*a7x(\text{campionamento},1)-$   
 $a7x(\text{campionamento}-1,1);$   
 $a7y(\text{campionamento}+1,1)=2*a7y(\text{campionamento},1)-$   
 $a7y(\text{campionamento}-1,1);$   
 $a8x(\text{campionamento}+1,1)=2*a8x(\text{campionamento},1)-$   
 $a8x(\text{campionamento}-1,1);$   
 $a8y(\text{campionamento}+1,1)=2*a8y(\text{campionamento},1)-$   
 $a8y(\text{campionamento}-1,1);$   
 $a9x(\text{campionamento}+1,1)=2*a9x(\text{campionamento},1)-$   
 $a9x(\text{campionamento}-1,1);$   
 $a9y(\text{campionamento}+1,1)=2*a9y(\text{campionamento},1)-$   
 $a9y(\text{campionamento}-1,1);$   
 $a10x(\text{campionamento}+1,1)=2*a10x(\text{campionamento},1)-$   
 $a10x(\text{campionamento}-1,1);$   
 $a10y(\text{campionamento}+1,1)=2*a10y(\text{campionamento},1)-$   
 $a10y(\text{campionamento}-1,1);$   
 $a11x(\text{campionamento}+1,1)=2*a11x(\text{campionamento},1)-$   
 $a11x(\text{campionamento}-1,1);$   
 $a11y(\text{campionamento}+1,1)=2*a11y(\text{campionamento},1)-$   
 $a11y(\text{campionamento}-1,1);$   
 $a12x(\text{campionamento}+1,1)=2*a12x(\text{campionamento},1)-$   
 $a12x(\text{campionamento}-1,1);$   
 $a12y(\text{campionamento}+1,1)=2*a12y(\text{campionamento},1)-$   
 $a12y(\text{campionamento}-1,1);$   
 $a13x(\text{campionamento}+1,1)=2*a13x(\text{campionamento},1)-$   
 $a13x(\text{campionamento}-1,1);$   
 $a13y(\text{campionamento}+1,1)=2*a13y(\text{campionamento},1)-$   
 $a13y(\text{campionamento}-1,1);$   
 $a14x(\text{campionamento}+1,1)=2*a14x(\text{campionamento},1)-$   
 $a14x(\text{campionamento}-1,1);$   
 $a14y(\text{campionamento}+1,1)=2*a14y(\text{campionamento},1)-$   
 $a14y(\text{campionamento}-1,1);$   
 $a15x(\text{campionamento}+1,1)=2*a15x(\text{campionamento},1)-$   
 $a15x(\text{campionamento}-1,1);$   
 $a15y(\text{campionamento}+1,1)=2*a15y(\text{campionamento},1)-$   
 $a15y(\text{campionamento}-1,1);$   
 $a16x(\text{campionamento}+1,1)=2*a16x(\text{campionamento},1)-$   
 $a16x(\text{campionamento}-1,1);$   
 $a16y(\text{campionamento}+1,1)=2*a16y(\text{campionamento},1)-$   
 $a16y(\text{campionamento}-1,1);$   
 $a17x(\text{campionamento}+1,1)=2*a17x(\text{campionamento},1)-$   
 $a17x(\text{campionamento}-1,1);$   
 $a17y(\text{campionamento}+1,1)=2*a17y(\text{campionamento},1)-$   
 $a17y(\text{campionamento}-1,1);$   
 $a18x(\text{campionamento}+1,1)=2*a18x(\text{campionamento},1)-$   
 $a18x(\text{campionamento}-1,1);$   
 $a18y(\text{campionamento}+1,1)=2*a18y(\text{campionamento},1)-$   
 $a18y(\text{campionamento}-1,1);$   
 $a19x(\text{campionamento}+1,1)=2*a19x(\text{campionamento},1)-$   
 $a19x(\text{campionamento}-1,1);$   
 $a19y(\text{campionamento}+1,1)=2*a19y(\text{campionamento},1)-$   
 $a19y(\text{campionamento}-1,1);$

```

a20x(campionamento+1,1)=2*a20x(campionamento,1)-
a20x(campionamento-1,1);
a20y(campionamento+1,1)=2*a20y(campionamento,1)-
a20y(campionamento-1,1);
a21x(campionamento+1,1)=2*a21x(campionamento,1)-
a21x(campionamento-1,1);
a21y(campionamento+1,1)=2*a21y(campionamento,1)-
a21y(campionamento-1,1);

%% Approssimazione accelerazione
a2x=((1./(10.^dec)).*sign(a2x)).*floor(abs(a2x.*(10.^dec)));
a3x=((1./(10.^dec)).*sign(a3x)).*floor(abs(a3x.*(10.^dec)));
a5x=((1./(10.^dec)).*sign(a5x)).*floor(abs(a5x.*(10.^dec)));
a6x=((1./(10.^dec)).*sign(a6x)).*floor(abs(a6x.*(10.^dec)));
a7x=((1./(10.^dec)).*sign(a7x)).*floor(abs(a7x.*(10.^dec)));
a8x=((1./(10.^dec)).*sign(a8x)).*floor(abs(a8x.*(10.^dec)));
a9x=((1./(10.^dec)).*sign(a9x)).*floor(abs(a9x.*(10.^dec)));
a10x=((1./(10.^dec)).*sign(a10x)).*floor(abs(a10x.*(10.^dec)
);
a11x=((1./(10.^dec)).*sign(a11x)).*floor(abs(a11x.*(10.^dec)
);
a12x=((1./(10.^dec)).*sign(a12x)).*floor(abs(a12x.*(10.^dec)
);
a13x=((1./(10.^dec)).*sign(a13x)).*floor(abs(a13x.*(10.^dec)
);
a14x=((1./(10.^dec)).*sign(a14x)).*floor(abs(a14x.*(10.^dec)
);
a15x=((1./(10.^dec)).*sign(a15x)).*floor(abs(a15x.*(10.^dec)
);
a16x=((1./(10.^dec)).*sign(a16x)).*floor(abs(a16x.*(10.^dec)
);
a17x=((1./(10.^dec)).*sign(a17x)).*floor(abs(a17x.*(10.^dec)
);
a18x=((1./(10.^dec)).*sign(a18x)).*floor(abs(a18x.*(10.^dec)
);
a19x=((1./(10.^dec)).*sign(a19x)).*floor(abs(a19x.*(10.^dec)
);
a20x=((1./(10.^dec)).*sign(a20x)).*floor(abs(a20x.*(10.^dec)
);
a21x=((1./(10.^dec)).*sign(a21x)).*floor(abs(a21x.*(10.^dec)
);

a2y=((1./(10.^dec)).*sign(a2y)).*floor(abs(a2y.*(10.^dec)));
a3y=((1./(10.^dec)).*sign(a3y)).*floor(abs(a3y.*(10.^dec)));
a5y=((1./(10.^dec)).*sign(a5y)).*floor(abs(a5y.*(10.^dec)));
a6y=((1./(10.^dec)).*sign(a6y)).*floor(abs(a6y.*(10.^dec)));
a7y=((1./(10.^dec)).*sign(a7y)).*floor(abs(a7y.*(10.^dec)));
a8y=((1./(10.^dec)).*sign(a8y)).*floor(abs(a8y.*(10.^dec)));
a9y=((1./(10.^dec)).*sign(a9y)).*floor(abs(a9y.*(10.^dec)));
a10y=((1./(10.^dec)).*sign(a10y)).*floor(abs(a10y.*(10.^dec)
);

```

```

a11y=((1./(10.^dec)).*sign(a11y)).*floor(abs(a11y.*(10.^dec))
);
a12y=((1./(10.^dec)).*sign(a12y)).*floor(abs(a12y.*(10.^dec))
);
a13y=((1./(10.^dec)).*sign(a13y)).*floor(abs(a13y.*(10.^dec))
);
a14y=((1./(10.^dec)).*sign(a14y)).*floor(abs(a14y.*(10.^dec))
);
a15y=((1./(10.^dec)).*sign(a15y)).*floor(abs(a15y.*(10.^dec))
);
a16y=((1./(10.^dec)).*sign(a16y)).*floor(abs(a16y.*(10.^dec))
);
a17y=((1./(10.^dec)).*sign(a17y)).*floor(abs(a17y.*(10.^dec))
);
a18y=((1./(10.^dec)).*sign(a18y)).*floor(abs(a18y.*(10.^dec))
);
a19y=((1./(10.^dec)).*sign(a19y)).*floor(abs(a19y.*(10.^dec))
);
a20y=((1./(10.^dec)).*sign(a20y)).*floor(abs(a20y.*(10.^dec))
);
a21y=((1./(10.^dec)).*sign(a21y)).*floor(abs(a21y.*(10.^dec))
);

```

```

a2=[a2x,a2y];
a3=[a3x,a3y];
a5=[a5x,a5y];
a6=[a6x,a6y];
a7=[a7x,a7y];
a8=[a8x,a8y];
a9=[a9x,a9y];
a10=[a10x,a10y];
a11=[a11x,a11y];
a12=[a12x,a12y];
a13=[a13x,a13y];
a14=[a14x,a14y];
a15=[a15x,a15y];
a16=[a16x,a16y];
a17=[a17x,a17y];
a18=[a18x,a18y];
a19=[a19x,a19y];
a20=[a20x,a20y];
a21=[a21x,a21y];

```

```

%% Vettori accelerazione rispetto al sistema di riferimento
fisso

```

```

for j=1:campionamento+1
    A2(j,1)=p2(j,1);
    A2(j,2)=p2(j,2);
    A2(j,3)=p2(j,1)+a2(j,1);
    A2(j,4)=p2(j,2)+a2(j,2);

```

A3(j,1)=p3(j,1);  
A3(j,2)=p3(j,2);  
A3(j,3)=p3(j,1)+a3(j,1);  
A3(j,4)=p3(j,2)+a3(j,2);

A5(j,1)=p5(j,1);  
A5(j,2)=p5(j,2);  
A5(j,3)=p5(j,1)+a5(j,1);  
A5(j,4)=p5(j,2)+a5(j,2);

A6(j,1)=p6(j,1);  
A6(j,2)=p6(j,2);  
A6(j,3)=p6(j,1)+a6(j,1);  
A6(j,4)=p6(j,2)+a6(j,2);

A7(j,1)=p7(j,1);  
A7(j,2)=p7(j,2);  
A7(j,3)=p7(j,1)+a7(j,1);  
A7(j,4)=p7(j,2)+a7(j,2);

A8(j,1)=p8(j,1);  
A8(j,2)=p8(j,2);  
A8(j,3)=p8(j,1)+a8(j,1);  
A8(j,4)=p8(j,2)+a8(j,2);

A9(j,1)=p9(j,1);  
A9(j,2)=p9(j,2);  
A9(j,3)=p9(j,1)+a9(j,1);  
A9(j,4)=p9(j,2)+a9(j,2);

A10(j,1)=p10(j,1);  
A10(j,2)=p10(j,2);  
A10(j,3)=p10(j,1)+a10(j,1);  
A10(j,4)=p10(j,2)+a10(j,2);

A11(j,1)=p11(j,1);  
A11(j,2)=p11(j,2);  
A11(j,3)=p11(j,1)+a11(j,1);  
A11(j,4)=p11(j,2)+a11(j,2);

A12(j,1)=p12(j,1);  
A12(j,2)=p12(j,2);  
A12(j,3)=p12(j,1)+a12(j,1);  
A12(j,4)=p12(j,2)+a12(j,2);

A13(j,1)=p13(j,1);  
A13(j,2)=p13(j,2);  
A13(j,3)=p13(j,1)+a13(j,1);  
A13(j,4)=p13(j,2)+a13(j,2);

A14(j,1)=p14(j,1);

```

A14(j,2)=p14(j,2);
A14(j,3)=p14(j,1)+a14(j,1);
A14(j,4)=p14(j,2)+a14(j,2);

A15(j,1)=p15(j,1);
A15(j,2)=p15(j,2);
A15(j,3)=p15(j,1)+a15(j,1);
A15(j,4)=p15(j,2)+a15(j,2);

A16(j,1)=p16(j,1);
A16(j,2)=p16(j,2);
A16(j,3)=p16(j,1)+a16(j,1);
A16(j,4)=p16(j,2)+a16(j,2);

A17(j,1)=p17(j,1);
A17(j,2)=p17(j,2);
A17(j,3)=p17(j,1)+a17(j,1);
A17(j,4)=p17(j,2)+a17(j,2);

A18(j,1)=p18(j,1);
A18(j,2)=p18(j,2);
A18(j,3)=p18(j,1)+a18(j,1);
A18(j,4)=p18(j,2)+a18(j,2);

A19(j,1)=p19(j,1);
A19(j,2)=p19(j,2);
A19(j,3)=p19(j,1)+a19(j,1);
A19(j,4)=p19(j,2)+a19(j,2);

A20(j,1)=p20(j,1);
A20(j,2)=p20(j,2);
A20(j,3)=p20(j,1)+a20(j,1);
A20(j,4)=p20(j,2)+a20(j,2);

A21(j,1)=p21(j,1);
A21(j,2)=p21(j,2);
A21(j,3)=p21(j,1)+a21(j,1);
A21(j,4)=p21(j,2)+a21(j,2);
end

%% Jerk giunti

for j=1:campionamento
t=tempo_campionamento;
jerk2x(j,1)=(a2(j+1,1)-a2(j,1))/t;
jerk2y(j,1)=(a2(j+1,2)-a2(j,2))/t;
jerk3x(j,1)=(a3(j+1,1)-a3(j,1))/t;
jerk3y(j,1)=(a3(j+1,2)-a3(j,2))/t;
jerk5x(j,1)=(a5(j+1,1)-a5(j,1))/t;
jerk5y(j,1)=(a5(j+1,2)-a5(j,2))/t;
jerk6x(j,1)=(a6(j+1,1)-a6(j,1))/t;

```

```

jerk6y(j,1)=(a6(j+1,2)-a6(j,2))/t;
jerk7x(j,1)=(a7(j+1,1)-a7(j,1))/t;
jerk7y(j,1)=(a7(j+1,2)-a7(j,2))/t;
jerk8x(j,1)=(a8(j+1,1)-a8(j,1))/t;
jerk8y(j,1)=(a8(j+1,2)-a8(j,2))/t;
jerk9x(j,1)=(a9(j+1,1)-a9(j,1))/t;
jerk9y(j,1)=(a9(j+1,2)-a9(j,2))/t;
jerk10x(j,1)=(a10(j+1,1)-a10(j,1))/t;
jerk10y(j,1)=(a10(j+1,2)-a10(j,2))/t;
jerk11x(j,1)=(a11(j+1,1)-a11(j,1))/t;
jerk11y(j,1)=(a11(j+1,2)-a11(j,2))/t;
jerk12x(j,1)=(a12(j+1,1)-a12(j,1))/t;
jerk12y(j,1)=(a12(j+1,2)-a12(j,2))/t;
jerk13x(j,1)=(a13(j+1,1)-a13(j,1))/t;
jerk13y(j,1)=(a13(j+1,2)-a13(j,2))/t;
jerk14x(j,1)=(a14(j+1,1)-a14(j,1))/t;
jerk14y(j,1)=(a14(j+1,2)-a14(j,2))/t;
jerk15x(j,1)=(a15(j+1,1)-a15(j,1))/t;
jerk15y(j,1)=(a15(j+1,2)-a15(j,2))/t;
jerk16x(j,1)=(a16(j+1,1)-a16(j,1))/t;
jerk16y(j,1)=(a16(j+1,2)-a16(j,2))/t;
jerk17x(j,1)=(a17(j+1,1)-a17(j,1))/t;
jerk17y(j,1)=(a17(j+1,2)-a17(j,2))/t;
jerk18x(j,1)=(a18(j+1,1)-a18(j,1))/t;
jerk18y(j,1)=(a18(j+1,2)-a18(j,2))/t;
jerk19x(j,1)=(a19(j+1,1)-a19(j,1))/t;
jerk19y(j,1)=(a19(j+1,2)-a19(j,2))/t;
jerk20x(j,1)=(a20(j+1,1)-a20(j,1))/t;
jerk20y(j,1)=(a20(j+1,2)-a20(j,2))/t;
jerk21x(j,1)=(a21(j+1,1)-a21(j,1))/t;
jerk21y(j,1)=(a21(j+1,2)-a21(j,2))/t;

```

end

```

jerk2x(campionamento+1,1)=2*jerk2x(campionamento,1)-
jerk2x(campionamento-1,1);
jerk2y(campionamento+1,1)=2*jerk2y(campionamento,1)-
jerk2y(campionamento-1,1);
jerk3x(campionamento+1,1)=2*jerk3x(campionamento,1)-
jerk3x(campionamento-1,1);
jerk3y(campionamento+1,1)=2*jerk3y(campionamento,1)-
jerk3y(campionamento-1,1);
jerk5x(campionamento+1,1)=2*jerk5x(campionamento,1)-
jerk5x(campionamento-1,1);
jerk5y(campionamento+1,1)=2*jerk5y(campionamento,1)-
jerk5y(campionamento-1,1);
jerk6x(campionamento+1,1)=2*jerk6x(campionamento,1)-
jerk6x(campionamento-1,1);
jerk6y(campionamento+1,1)=2*jerk6y(campionamento,1)-
jerk6y(campionamento-1,1);
jerk7x(campionamento+1,1)=2*jerk7x(campionamento,1)-
jerk7x(campionamento-1,1);

```

```

jerk7y(campionamento+1,1)=2*jerk7y(campionamento,1)-
jerk7y(campionamento-1,1);
jerk8x(campionamento+1,1)=2*jerk8x(campionamento,1)-
jerk8x(campionamento-1,1);
jerk8y(campionamento+1,1)=2*jerk8y(campionamento,1)-
jerk8y(campionamento-1,1);
jerk9x(campionamento+1,1)=2*jerk9x(campionamento,1)-
jerk9x(campionamento-1,1);
jerk9y(campionamento+1,1)=2*jerk9y(campionamento,1)-
jerk9y(campionamento-1,1);
jerk10x(campionamento+1,1)=2*jerk10x(campionamento,1)-
jerk10x(campionamento-1,1);
jerk10y(campionamento+1,1)=2*jerk10y(campionamento,1)-
jerk10y(campionamento-1,1);
jerk11x(campionamento+1,1)=2*jerk11x(campionamento,1)-
jerk11x(campionamento-1,1);
jerk11y(campionamento+1,1)=2*jerk11y(campionamento,1)-
jerk11y(campionamento-1,1);
jerk12x(campionamento+1,1)=2*jerk12x(campionamento,1)-
jerk12x(campionamento-1,1);
jerk12y(campionamento+1,1)=2*jerk12y(campionamento,1)-
jerk12y(campionamento-1,1);
jerk13x(campionamento+1,1)=2*jerk13x(campionamento,1)-
jerk13x(campionamento-1,1);
jerk13y(campionamento+1,1)=2*jerk13y(campionamento,1)-
jerk13y(campionamento-1,1);
jerk14x(campionamento+1,1)=2*jerk14x(campionamento,1)-
jerk14x(campionamento-1,1);
jerk14y(campionamento+1,1)=2*jerk14y(campionamento,1)-
jerk14y(campionamento-1,1);
jerk15x(campionamento+1,1)=2*jerk15x(campionamento,1)-
jerk15x(campionamento-1,1);
jerk15y(campionamento+1,1)=2*jerk15y(campionamento,1)-
jerk15y(campionamento-1,1);
jerk16x(campionamento+1,1)=2*jerk16x(campionamento,1)-
jerk16x(campionamento-1,1);
jerk16y(campionamento+1,1)=2*jerk16y(campionamento,1)-
jerk16y(campionamento-1,1);
jerk17x(campionamento+1,1)=2*jerk17x(campionamento,1)-
jerk17x(campionamento-1,1);
jerk17y(campionamento+1,1)=2*jerk17y(campionamento,1)-
jerk17y(campionamento-1,1);
jerk18x(campionamento+1,1)=2*jerk18x(campionamento,1)-
jerk18x(campionamento-1,1);
jerk18y(campionamento+1,1)=2*jerk18y(campionamento,1)-
jerk18y(campionamento-1,1);
jerk19x(campionamento+1,1)=2*jerk19x(campionamento,1)-
jerk19x(campionamento-1,1);
jerk19y(campionamento+1,1)=2*jerk19y(campionamento,1)-
jerk19y(campionamento-1,1);
jerk20x(campionamento+1,1)=2*jerk20x(campionamento,1)-
jerk20x(campionamento-1,1);

```

```

jerk20y(campionamento+1,1)=2*jerk20y(campionamento,1)-
jerk20y(campionamento-1,1);
jerk21x(campionamento+1,1)=2*jerk21x(campionamento,1)-
jerk21x(campionamento-1,1);
jerk21y(campionamento+1,1)=2*jerk21y(campionamento,1)-
jerk21y(campionamento-1,1);

```

```

jerk2=[jerk2x,jerk2y];
jerk3=[jerk3x,jerk3y];
jerk5=[jerk5x,jerk5y];
jerk6=[jerk6x,jerk6y];
jerk7=[jerk7x,jerk7y];
jerk8=[jerk8x,jerk8y];
jerk9=[jerk9x,jerk9y];
jerk10=[jerk10x,jerk10y];
jerk11=[jerk11x,jerk11y];
jerk12=[jerk12x,jerk12y];
jerk13=[jerk13x,jerk13y];
jerk14=[jerk14x,jerk14y];
jerk15=[jerk15x,jerk15y];
jerk16=[jerk16x,jerk16y];
jerk17=[jerk17x,jerk17y];
jerk18=[jerk18x,jerk18y];
jerk19=[jerk19x,jerk19y];
jerk20=[jerk20x,jerk20y];
jerk21=[jerk21x,jerk21y];

```

figure (1)

```
for i=1:size(z1)
```

```
    hold on
```

```
        axis equal
```

```
        P19=plot3(p19(i,1),p19(i,2),p19(i,3));
```

```
        P16=plot3(p16(i,1),p16(i,2),p16(i,3));
```

```
        P17=plot3(p17(i,1),p17(i,2),p17(i,3));
```

```
VET1=quiver3(p1(i,1),p1(i,2),p1(i,3),z1x(i,1),z1y(i,1),z1z(i,1),1,'b');
```

```
VET2=quiver3(p4(i,1),p4(i,2),p4(i,3),z2x(i,1),z2y(i,1),z2z(i,1),1,'b');
```

```
VET3=quiver3(p2(i,1),p2(i,2),p2(i,3),z3x(i,1),z3y(i,1),z3z(i,1),1,'b');
```

```
VET4=quiver3(p3(i,1),p3(i,2),p3(i,3),z4x(i,1),z4y(i,1),z4z(i,1),1,'b');
```

```
VET5=quiver3(p6(i,1),p6(i,2),p6(i,3),z5x(i,1),z5y(i,1),z5z(i,1),1,'b');
```

```

VET6=quiver3(p7(i,1),p7(i,2),p7(i,3),z6x(i,1),z6y(i,1),z6z(i,
1),1,'b');

VET7=quiver3(p8(i,1),p8(i,2),p8(i,3),z7x(i,1),z7y(i,1),z7z(i,
1),1,'b');

VET8=quiver3(p9(i,1),p9(i,2),p9(i,3),z8x(i,1),z8y(i,1),z8z(i,
1),1,'b');

VET9=quiver3(p10(i,1),p10(i,2),p10(i,3),z9x(i,1),z9y(i,1),z9z
(i,1),1,'b');

VET10=quiver3(p6(i,1),p6(i,2),p6(i,3),z10x(i,1),z10y(i,1),z10
z(i,1),1,'b');

VET11=quiver3(p11(i,1),p11(i,2),p11(i,3),z11x(i,1),z11y(i,1),
z11z(i,1),1,'b');

VET12=quiver3(p11(i,1),p11(i,2),p11(i,3),z12x(i,1),z12y(i,1),
z2z(i,1),1,'b');

VET13=quiver3(p10(i,1),p10(i,2),p10(i,3),z13x(i,1),z13y(i,1),
z13z(i,1),1,'b');

VET14=quiver3(p12(i,1),p12(i,2),p12(i,3),z14x(i,1),z14y(i,1),
z14z(i,1),1,'b');

VET15=quiver3(p11(i,1),p11(i,2),p11(i,3),z15x(i,1),z15y(i,1),
z15z(i,1),1,'b');

VET16=quiver3(p13(i,1),p13(i,2),p13(i,3),z16x(i,1),z16y(i,1),
z16z(i,1),1,'b');

VET17=quiver3(p14(i,1),p14(i,2),p14(i,3),z17x(i,1),z17y(i,1),
z17z(i,1),1,'b');

VET18=quiver3(p13(i,1),p13(i,2),p13(i,3),z18x(i,1),z18y(i,1),
z18z(i,1),1,'b');

VET19=quiver3(p15(i,1),p15(i,2),p15(i,3),z19x(i,1),z19y(i,1),
z19z(i,1),1,'b');

aaa=quiver3(V9(i,1),V9(i,2),V9(i,3),v9(i,1),v9(i,2),v9(i,3),1
);

bbb=quiver3(V15(i,1),V15(i,2),V15(i,3),v15(i,1),v15(i,2),v15(
i,3),1);

ccc=quiver3(V17(i,1),V17(i,2),V17(i,3),v17(i,1),v17(i,2),v17(
i,3),1);

```

```

ddd=quiver3(V18(i,1),V18(i,2),V18(i,3),v18(i,1),v18(i,2),v18(
i,3),1);

eee=quiver3(V19(i,1),V19(i,2),V19(i,3),v19(i,1),v19(i,2),v19(
i,3),1);

fff=quiver3(A9(i,1),A9(i,2),A9(i,3),a9(i,1),a9(i,2),a9(i,3),1
);

ggg=quiver3(A15(i,1),A15(i,2),A15(i,3),a15(i,1),a15(i,2),a15(
i,3),1);

hhh=quiver3(A17(i,1),A17(i,2),A17(i,3),a17(i,1),a17(i,2),a17(
i,3),1);

iii=quiver3(A18(i,1),A18(i,2),A18(i,3),a18(i,1),a18(i,2),a18(
i,3),1);

lll=quiver3(A19(i,1),A19(i,2),A19(i,3),a19(i,1),a19(i,2),a19(
i,3),1);
    pause(tempo_campionamento);

delete(VET1),delete(VET2),delete(VET3),delete(VET4),delete(VE
T5),delete(VET6),delete(VET7),delete(VET8),delete(VET9),delet
e(VET10),delete(VET11),delete(VET12),delete(VET13),delete(VET
14),delete(VET15),delete(VET16),delete(VET17),delete(VET18),d
elete(VET19)

    delete(aaa);
    delete(bbb);
    delete(ccc);
    delete(ddd);
    delete(eee);
    delete(fff);
    delete(ggg);
    delete(hhh);
    delete(iii);
    delete(lll);

    hold on
end

```

## Appendice B

### SCRIPT MATLAB PER L'ANALISI DINAMICA RELATIVA AL PIANO (X,Y)

```
%% Cinetostatica
g=-9.81*1000;
Inc=zeros(1,14);

for j=1:campionamento+1
    A=[0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,1,0
        0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,1
        0,0,0,0,0,0,0,0,z11*sin(Phi11(j,1)),-
z11*cos(Phi11(j,1)),0,0,0,0
        0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,1,0,-1,0
        0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,-1
        0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,-
z4*sin(Phi4(j,1)),z4*cos(Phi4(j,1)),+(z4+z8)*sin(Phi4(j,1)),-
(z4+z8)*cos(Phi4(j,1))
        0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,-1,0,0,0
        0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,-1,0,0
        0,0,0,0,0,0,-
z6*sin(Phi6(j,1)),z6*cos(Phi6(j,1)),0,0,0,0,0,0
        0,0,0,0,1,0,0,0,-1,0,0,0,0,0
        0,0,0,0,0,1,0,0,0,-1,0,0,0,0
        0,0,0,0,z10*sin(Phi10(j,1)),-
z10*cos(Phi10(j,1)),0,0,0,0,0,0,0,0
        1,0,0,0,-1,0,-1,0,0,0,0,0,0,0
        0,0,0,1,0,-1,0,-1,0,0,0,0,0,0];
    B=[(M16*a16x(j,1))+(Mpinza+Mcarico)*a14x(j,1))-
(M16*(deltaYvell(j,1)^2)*p16x(j,1))-
(Mcarico*(deltaYvell(j,1)^2)*p14x(j,1))
        (M16*(a16y(j,1)-
g))+(Mpinza+Mcarico)*(a14y(j,1)-g))
        -(-
(Mpinza+Mcarico)*g*(z11+z15)*cos(Phi11(j,1)))-(-
M16*g*(z11+z15-z20)*cos(Phi11(j,1)))-
((Mpinza+Mcarico)*a14x(j,1)*(z11+z15)*sin(Phi11(j,1)))-(-
(Mpinza+Mcarico)*a14y(j,1)*(z11+z15)*cos(Phi11(j,1)))-
(M16*a16x(j,1)*(z11+z15-z20)*sin(Phi11(j,1)))-(-
M16*a16y(j,1)*(z11+z15-
z20)*cos(Phi11(j,1)))+(J16*deltaOmega11(j,1))+(J16+(M16*((z1
5+z11-z20)^2))*deltaOmega11(j,1))-
((Mcarico*(deltaYvell(j,1)^2)*p14x(j,1))*(z11+z14)*sin(Phi11(
```

```

j,1))-(M16*(deltaYvell(j,1)^2)*p16x(j,1))*(z11+z14-
z20)*sin(Phi11(j,1))
      (M17*a17x(j,1))-
(M17*(deltaYvell(j,1)^2)*p17x(j,1))
      (M17*(a17y(j,1)-g)+(M20*(a3y(j,1)-g))
      -(M17*g*(z8+z4-z21)*cos(Phi4(j,1)))-(-
M17*a17x(j,1)*(z8+z4-z21)*sin(Phi4(j,1)))-
(M17*a17y(j,1)*(z8+z4-
z21)*cos(Phi4(j,1)))+(J17*deltaOmega4(j,1))+((J17+(M17*((z8+z
4-z21)^2)))*deltaOmega4(j,1))-(-
(M17*(deltaYvell(j,1)^2)*p17x(j,1))*(z8+z4-
z21)*sin(Phi4(j,1))
      (M18*a18x(j,1))-
(M18*(deltaYvell(j,1)^2)*p18x(j,1))
      (M18*(+a18y(j,1)-g))
      -(M18*g*(z6-z22)*cos(Phi6(j,1)))-(-
M18*a18x(j,1)*(z6-z22)*sin(Phi6(j,1)))-(M18*a18y(j,1)*(z6-
z22)*cos(Phi6(j,1)))+(J18*deltaOmega6(j,1))+((J18+(M18*((z6-
z22)^2)))*deltaOmega6(j,1))-(-
(M18*(deltaYvell(j,1)^2)*p18x(j,1))*(z6-z22)*sin(Phi6(j,1))
      (M19*a19x(j,1))-
(M19*(deltaYvell(j,1)^2)*p19x(j,1))
      (M19*(a19y(j,1)-g))
      -(-M19*g*z23*cos(Phi10(j,1)))-
(M19*a19x(j,1)*z23*sin(Phi10(j,1)))-(-
M19*a19y(j,1)*z23*cos(Phi10(j,1)))+(J19*deltaOmega10(j,1))+((
J19+(M19*((z10-z23)^2)))*deltaOmega10(j,1))-
((M19*(deltaYvell(j,1)^2)*p19x(j,1))*z23*sin(Phi10(j,1))
      (M21*a5x(j,1))
      (-M21*g)];

```

```

inc=(A\B)';
Inc=[Inc;inc];
X(j,1)=-Inc(j,1)/1000;
Y(j,1)=-Inc(j,2)/1000;
H(j,1)=Inc(j,3)/1000;
T(j,1)=Inc(j,4)/1000;

```

```
end
```

## Appendice C

### SCRIPT MATLAB PER L'ANALISI DINAMICA RELATIVA ALLA ROTAZIONE DELLA TORRETTA

```
%% Calcolo momento rotazione
C=(Mpinza+Mcarico)*((p14x(1,1)/1000)^2)+M16*((p16x(1,1)/1000)^2)+M17*((p17x(1,1)/1000)^2)+M18*((p18x(1,1)/1000)^2)+M19*((p19x(1,1)/1000)^2)+M20*((p20x(1,1)/1000)^2)+M21*((p21x(1,1)/1000)^2)+Mmotore_X*((x_Mmotore_X/1000)^2)+Mmotore_Y*((x_Mmotore_Y/1000)^2)+Mmotore_deltaY*((x_Mmotore_deltaY/1000)^2)+J_tor)*deltaYaccl;
```

figure(1)  
plot(C)

## Appendice D

### SCRIPT MATLAB RELATIVO AGLI AZIONAMENTI ORIZZONTALI E VERTICALI

```
%%Richiamo la funzione di calcolo della dinamica del Piano
Cartesiano
[X,Y]=dinamica_meccanismo_Pian_Cartesiano()

%% Inerzie trasmissione
J_vitel=0.004; % inerzia vite Y
J_vite2=0.002; % inerzia vite X
J_y1=0.001; % inerzia puleggia asse motrice Y
J_y2=0.003; % inerzia puleggia asse condotta Y
J_x1=0.001; % inerzia puleggia asse motrice X
J_x2=0.005; % inerzia puleggia asse condotta X
J_mot1=0.006;
J_mot2=0.002;

%% Dati vite a ricircolo
passo1=20; %Passo vite a ricircolo di sfera dell'asse Y
passo2=10; %Passo vite a ricircolo di sfera dell'asse X
diam_prim_vitel=50;
diam_prim_vite2=50;
rag_prim_vitel=diam_prim_vitel/2;
rag_prim_vite2=diam_prim_vite2/2;
ro_viti=(0.34*pi)/180;
tan_phi_x=passo2/(diam_prim_vite2*pi);
tan_phi_y=passo1/(diam_prim_vitel*pi);
phi_x=atan(tan_phi_x);
phi_y=atan(tan_phi_y);
rend_x=(tan(phi_x))/(tan(phi_x+ro_viti));
rend_y=(tan(phi_y))/(tan(phi_y+ro_viti));
rend_prat_x=0.95*rend_x*0.95;
rend_prat_y=0.95*rend_y*0.95;

%% Dati Cinghie
zy1=36; % Ruota motrice (connessa al motore) asse Y
zy2=80; % Ruota condotta (connessa con la vite a ricircolo di
sfere) asse Y
zx1=28; % Ruota motrice (connessa al motore) asse X
zx2=56; % Ruota condotta (connessa con la vite a ricircolo di
sfere) asse X
diam_prim_mot_cinghia1=91.68;
diam_prim_cond_cinghia1=203.72;
diam_prim_mot_cinghia2=71.30;
```

```

diam_prim_cond_cinghia2=142.61;
rag_prim_mot_cinghia1=diam_prim_mot_cinghia1/2;
rag_prim_cond_cinghia1=diam_prim_cond_cinghia1/2;
rag_prim_mot_cinghia2=diam_prim_mot_cinghia2/2;
rag_prim_cond_cinghia2=diam_prim_cond_cinghia2/2;
rend_cinghia=0.97;
tao1=rag_prim_mot_cinghia1/rag_prim_cond_cinghia1;
tao2=rag_prim_mot_cinghia2/rag_prim_cond_cinghia2;

%% Calcolo dei momenti
M1=((Y(1:campionamento)*passo1)/(2000*pi*rend_prat_y))*(tao1/rend_cinghia)+((J_vite1+J_y2)*(tao1^2)/rend_cinghia)+(J_mot1+J_y1))*((acc1(1:campionamento))*(tao1)*((2*pi)/(passo1)));
M2=((X(1:campionamento)*passo2)/(2000*pi*rend_prat_x))*(tao2/rend_cinghia)+((J_vite2+J_x2)*(tao2^2)/rend_cinghia)+(J_mot2+J_x2))*((acc2(1:campionamento))*(tao2)*((2*pi)/(passo2)));

for j=1:campionamento
    M1star(j,1)=(M1(j,1)^2)*tempo_campionamento;
    M2star(j,1)=(M2(j,1)^2)*tempo_campionamento;
end

for j=1:campionamento
    M1_rms(j,1)=sqrt((1/tempo_ciclo)*sum(M1star));
    M2_rms(j,1)=sqrt((1/tempo_ciclo)*sum(M2star));
end

%% Calcolo della velocità angolare
sigma1=((z1*2*pi)/(passo1))*(1/tao1);
sigma2=((z2*2*pi)/(passo2))*(1/tao2);

for j=1:campionamento
    t=tempo_campionamento;
    rpm1(j,1)=((sigma1(j+1,1)-sigma1(j,1))/t)*(60/(2*pi));
    rpm2(j,1)=((sigma2(j+1,1)-sigma2(j,1))/t)*(60/(2*pi));
end

rpm1(campionamento+1,1)=2*rpm1(campionamento,1)-rpm1(campionamento-1,1);
rpm2(campionamento+1,1)=2*rpm2(campionamento,1)-rpm2(campionamento-1,1);

for j=1:campionamento+1
    rpm1star(j,1)=(rpm1(j,1)^2)*tempo_campionamento;
    rpm2star(j,1)=(rpm2(j,1)^2)*tempo_campionamento;
end
for j=1:campionamento+1

```

```

        rpm1_rms(j,1)=sqrt((1/tempo_ciclo)*sum(rpm1star));
        rpm2_rms(j,1)=sqrt((1/tempo_ciclo)*sum(rpm2star));
end

%% Plot
figure(1)

subplot(4,1,1)
plot(z1)
title('Y')
subplot(4,1,2)
plot([0:campionamento],acc1)
title('accelerazione Y')
subplot(4,1,3)
plot(M1)
title('Momento al motore 1')
subplot(4,1,4)
plot([0:campionamento],rpm1)
title('rpm1')

%-----
figure(2)

subplot(4,1,1)
plot(z2)
title('X')
subplot(4,1,2)
plot([0:campionamento],acc2)
title('accelerazione X')
subplot(4,1,3)
plot(M2)
title('Momento al motore 2')
subplot(4,1,4)
plot([0:campionamento],rpm2)
title('rpm2')

%-----
figure(3)
hold on
plot(rpm1(1:campionamento,1),M1)
plot(rpm1_rms(1:campionamento,1),M1_rms,'o')
title('Luogo del carico Y')
hold off

%-----
figure(4)
hold on
plot(rpm2(1:campionamento,1),M2)
plot(rpm2_rms(1:campionamento,1),M2_rms,'o')
title('Luogo del carico X')
hold off

```

## Appendice E

### SCRIPT MATLAB RELATIVO ALL'AZIONAMENTO DELLA TORRETTA

```
%%Richiamo la funzione di calcolo della dinamica del Piano
Cartesiano
[C]=dinamica_meccanismo_Rotazione();

%% Inerzie trasmissione
J_y_mot=0.002;
J_y_cond=0.002;
J_cyclo=0.0114;
J_mot=0.006;

%% Dati cinghia
zy_mot=40;
zy_cond=56;
diam_prim_mot_cinghia=101.86;
diam_prim_cond_cinghia=142.61;
rag_prim_mot_cinghia=diam_prim_mot_cinghia/2;
rag_prim_cond_cinghia=diam_prim_cond_cinghia/2;
rend_cinghia=0.97;
%% Dati Cyclo F2CF-C35-90
tao=(rag_prim_mot_cinghia/rag_prim_cond_cinghia)*(1/90);
rend_cyclo=0.7;

%% Calcolo dei momenti
M=((C*tao)/(rend_cinghia*rend_cyclo))+(((J_cyclo+J_y_cond)*(t
ao/(rend_cinghia*rend_cyclo))+(J_y_mot+J_mot))*deltaYacc1);

for j=1:campionamento
    Mstar(j,1)=(M(j,1)^2)*tempo_campionamento;
end

for j=1:campionamento
    M_rms(j,1)=sqrt((1/tempo_ciclo)*sum(Mstar));
End

%% Calcolo della velocità angolare
sigma=deltaY/tao;
for j=1:campionamento
    t=tempo_campionamento;
    rpm(j,1)=(sigma(j+1,1)-sigma(j,1))/t)*(60/(2*pi));
end
```

```

rpm(campionamento+1,1)=2*rpm(campionamento,1)-
rpm(campionamento-1,1);

for j=1:campionamento+1
    rpmstar(j,1)=(rpm(j,1)^2)*tempo_campionamento;
end
for j=1:campionamento+1
    rpm_rms(j,1)=sqrt((1/tempo_ciclo)*sum(rpmstar));
end

%% Plot
figure(1)

subplot(4,1,1)
plot(deltaY)
title('Y')

subplot(4,1,2)
plot([0:campionamento],deltaYacc1)
title('accelerazione Y')

subplot(4,1,3)
plot(M)
title('Momento al motore')

subplot(4,1,4)
plot([0:campionamento],rpm)
title('rpm')

```

## Appendice F

### SCRIPT MATLAB RELATIVO ALLE SOLLECITAZIONI

```
for j=1:campionamento
%-----Membro A-----%
    % Tratto 14-16
    N_14_16(j,1)=(((Mpinza+Mcarico)*(-
a14x(j,1)))*cos(pi-Phi9(j,1)))-(((Mpinza+Mcarico)*(g-
a14y(j,1)))*cos(Phi9(j,1)-(pi/2))))/1000;
    T_14_16(j,1)=(((Mpinza+Mcarico)*(-
a14x(j,1)))*sin(pi-Phi9(j,1)))+(((Mpinza+Mcarico)*(g-
a14y(j,1)))*sin(Phi9(j,1)-(pi/2))))/1000;
    Mf_16(j,1)=(T_14_16(j,1)*z20)/1000;

    % Tratto 16-11
    N_16_11(j,1)=N_14_16(j,1)+((M16*(-
a16x(j,1)))*cos(pi-Phi9(j,1)))-((M16)*(g-
a16y(j,1)))*cos(Phi9(j,1)-(pi/2))))/1000;
    T_16_11(j,1)=T_14_16(j,1)+(((M16*(-
a16x(j,1)))*sin(pi-Phi9(j,1)))+((M16)*(g-
a16y(j,1)))*sin(Phi9(j,1)-(pi/2))))/1000;

    % Tratto 11-9
    N_11_9(j,1)=N_16_11(j,1)+(X3(j+1,1)*cos(pi-
Phi9(j,1)))-(Y3(j+1,1)*cos(Phi9(j,1)-(pi/2)));
    T_11_9(j,1)=T_16_11(j,1)+(X3(j+1,1)*sin(pi-
Phi9(j,1)))+(Y3(j+1,1)*sin(Phi9(j,1)-(pi/2)));
    T_9_11(j,1)=(X5(j+1,1)*sin(pi-
Phi9(j,1)))+(Y5(j+1,1)*sin(Phi9(j,1)-(pi/2)));
    Mf_11(j,1)=(T_9_11(j,1)*z11)/1000;

%-----Membro B-----%
    % Tratto 9-17
    N_9_17(j,1)=((-X5(j+1,1)*cos(Phi4(j,1)))+(-
Y5(j+1,1)*cos((pi/2)-Phi4(j,1)))));
    T_9_17(j,1)=((-X5(j+1,1)*sin(Phi4(j,1)))-(-
Y5(j+1,1)*sin((pi/2)-Phi4(j,1)))));
    Mf_17(j,1)=(T_9_17(j,1)*z21)/1000;

    % Tratto 17-7
    N_17_7(j,1)=N_9_17(j,1)+(((M17)*(-
a17x(j,1)))*cos(Phi4(j,1)))+((M17)*(g-
a17y(j,1)))*cos((pi/2)-Phi4(j,1)))/1000;
```

```

        T_17_7(j,1)=T_9_17(j,1)+(((M17)*(-
a17x(j,1))) *sin(Phi4(j,1)))-((M17)*(g-
a17y(j,1))) *sin((pi/2)-Phi4(j,1)))/1000;

        % Tratto 7-3

N_7_3(j,1)=N_17_7(j,1)+((X4(j+1,1)*cos(Phi4(j,1)))+(Y4(j+1,1)
*cos((pi/2)-Phi4(j,1))));
        T_3_7(j,1)=-((H(j+1,1)*sin(Phi4(j,1)))-(-
Y(j+1,1)*sin((pi/2)-Phi4(j,1)))+(((M20)*(g-
a3y(j,1))) *sin((pi/2)-Phi4(j,1)))/1000));
        Mf_7(j,1)=(T_3_7(j,1)*(z4))/1000;

%-----Membro C-----%
        % Tratto 7-18
        N_7_18(j,1)=-(-X4(j+1,1)*(cos((2*pi)-Phi6(j,1)))+(
Y4(j+1,1)*sin((2*pi)-(Phi6(j,1))));
        T_7_18(j,1)=+(-X4(j+1,1)*(sin((2*pi)-Phi6(j,1)))+(
Y4(j+1,1)*cos((2*pi)-(Phi6(j,1))));

        % Tratto 18-6
        N_18_6(j,1)=N_7_18(j,1)+(-((M18)*(-
a18x(j,1))*sin((2*pi)-Phi6(j,1)))+(M18)*(g-
a18y(j,1))*cos((2*pi)-Phi6(j,1)))/1000;
        T_18_6(j,1)=T_7_18(j,1)+((M18)*(-
a18x(j,1))*sin((2*pi)-Phi6(j,1)))+(M18)*(g-
a18y(j,1))*cos((2*pi)-Phi6(j,1)))/1000;
        Mf_18(j,1)=(T_18_6(j,1)*z22)/1000;

%-----Membro D-----%
        % Tratto 11-19
        N_11_19(j,1)=(-X3(j+1,1)*(cos(Phi10(j,1)))+(
Y3(j+1,1)*sin(Phi10(j,1)));
        T_11_19(j,1)=-(-X3(j+1,1)*(sin(Phi10(j,1)))+(
Y3(j+1,1)*cos(Phi10(j,1)));

        % Tratto 18-6
        N_19_6(j,1)=N_11_19(j,1)+((M19)*(-
a19x(j,1))*cos(Phi10(j,1)))+(M19)*(g-
a19y(j,1))*sin(Phi10(j,1)))/1000;
        T_19_6(j,1)=T_11_19(j,1)+(-((M19)*(-
a19x(j,1))*sin(Phi10(j,1)))+(M19)*(g-
a19y(j,1))*cos(Phi10(j,1)))/1000;
        Mf_19(j,1)=(T_19_6(j,1)*z23)/1000;
end

```

## Appendice G

### SCRIPT MATLAB RELATIVO ALLA MAPPATURA NEL PIANO (X,Y)

```
clear,clc
tic
%%-%%-%%-%%-%%--% MAPPATURA %--%-%%-%%-%%-%%
campionamento=50;
tempo_ciclo=2.2;
n_x=8;
n_y=8;
z1_map=linspace(0,472,n_y)';
z2_map=linspace(0,266,n_x)';
deltaY_map=[0,pi/2,pi]';

b=0;
c=0;
k=0;
q=0;
for b=1:max(size(z1_map))
    q=q+1;
    for c=q:max(size(z1_map))
        k=k+1;
        mov_y_and(k,1)=b;
        mov_y_and(k,2)=c;
    end
end

d=0;
e=0;
kk=0;
qq=0;
for d=1:max(size(z2_map))
    qq=qq+1;
    for e=qq:max(size(z2_map))
        kk=kk+1;
        mov_x_and(kk,1)=d;
        mov_x_and(kk,2)=e;
    end
end

mov_Y_rit=[mov_y_and(:,2),mov_y_and(:,1)];
mov_X_rit=[mov_x_and(:,2),mov_x_and(:,1)];

for i=1:max(size(mov_Y_rit))
```

```

    if mov_Y_rit(i,1)==mov_Y_rit(i,2)
        mov_y_rit(i,1)=0;
        mov_y_rit(i,2)=0;
    elseif mov_Y_rit(i,1)~=mov_Y_rit(i,2)
        mov_y_rit(i,1)=mov_y_and(i,2);
        mov_y_rit(i,2)=mov_y_and(i,1);
    end
end
for i=1:max(size(mov_X_rit))
    if mov_X_rit(i,1)==mov_X_rit(i,2)
        mov_x_rit(i,1)=0;
        mov_x_rit(i,2)=0;
    elseif mov_X_rit(i,1)~=mov_X_rit(i,2)
        mov_x_rit(i,1)=mov_x_and(i,2);
        mov_x_rit(i,2)=mov_x_and(i,1);
    end
end

sort_mov_x_rit=sort(mov_x_rit);
sort_mov_y_rit=sort(mov_y_rit);
mov_x_rit=sort_mov_x_rit(n_y+1:max(size(sort_mov_x_rit)),:);
mov_y_rit=sort_mov_y_rit(n_y+1:max(size(sort_mov_y_rit)),:);

%% Andata X e Andata Y
n=0;
m=0;
r=0;
f=0;
count=0;
s=0;
i=0;
j=0;
for s=1:max(size(deltaY_map))
    deltaYmin=0;
    deltaYmax=deltaY_map(s,1);
    for i=1:max(size(mov_y_and))
        z1min=z1_map(mov_y_and(i,1));
        z1max=z1_map(mov_y_and(i,2));
        for j=1:max(size(mov_x_and))
            n=n+1;
            r=r+1;
            count=count+1;
            z2min=z2_map(mov_x_and(j,1));
            z2max=z2_map(mov_x_and(j,2));
        end
    end
end

[M1,M2,rpml,rpm2,M1_rms,M2_rms,rpml_rms,rpm2_rms]=Azionamenti
_Piano_Cartesiano_map(z1min,z1max,z2min,z2max,deltaYmin,delta
Ymax,campionamento,tempo_ciclo);
Momento_y_and(r,1)=max(abs(M1));
Momento_y_rms_and(r,1)=max(abs(M1_rms));
Momento_x_and(n,1)=max(abs(M2));
Momento_x_rms_and(n,1)=max(abs(M2_rms));

```

```

        Revolution_y_and(r,1)=max(abs(rpm1));
        Revolution_y_rms_and(r,1)=max(abs(rpm1_rms));
        Revolution_x_and(n,1)=max(abs(rpm2));
        Revolution_x_rms_and(n,1)=max(abs(rpm2_rms));
        general_mov(count,1)=z2min;
        general_mov(count,2)=z2max;
        general_mov(count,3)=z1min;
        general_mov(count,4)=z1max;
        general_mov(count,5)=deltaYmin;
        general_mov(count,6)=deltaYmax;
        general_mov(count,7)=Momento_x_and(n,1);
        general_mov(count,8)=Momento_y_and(r,1);
    end
end
end

%% Andata X e Ritorno Y
s=0;
i=0;
j=0;
for s=1:max(size(deltaY_map))
    deltaYmin=0;
    deltaYmax=deltaY_map(s,1);
    for i=1:max(size(mov_y_rit))
        z1min=z1_map(mov_y_rit(i,1));
        z1max=z1_map(mov_y_rit(i,2));
        for j=1:max(size(mov_x_and))
            n=n+1;
            f=f+1;
            count=count+1;
            z2min=z2_map(mov_x_and(j,1));
            z2max=z2_map(mov_x_and(j,2));

[M1,M2,rpm1,rpm2,M1_rms,M2_rms,rpm1_rms,rpm2_rms]=Azionamenti
_Piano_Cartesiano_map(z1min,z1max,z2min,z2max,deltaYmin,delta
Ymax,campionamento,tempo_ciclo);
        Momento_y_rit(f,1)=max(abs(M1));
        Momento_y_rms_rit(f,1)=max(abs(M1_rms));
        Momento_x_and(n,1)=max(abs(M2));
        Momento_x_rms_and(n,1)=max(abs(M2_rms));
        Revolution_y_rit(f,1)=max(abs(rpm1));
        Revolution_y_rms_rit(f,1)=max(abs(rpm1_rms));
        Revolution_x_and(n,1)=max(abs(rpm2));
        Revolution_x_rms_and(n,1)=max(abs(rpm2_rms));
        general_mov(count,1)=z2min;
        general_mov(count,2)=z2max;
        general_mov(count,3)=z1min;
        general_mov(count,4)=z1max;
        general_mov(count,5)=deltaYmin;
        general_mov(count,6)=deltaYmax;
        general_mov(count,7)=Momento_x_and(n,1);
        general_mov(count,8)=Momento_y_rit(f,1);
    end
end
end

```

```

        end
    end
end

%% Ritorno X e Andata Y
s=0;
i=0;
j=0;
for s=1:max(size(deltaY_map))
    deltaYmin=0;
    deltaYmax=deltaY_map(s,1);
    for i=1:max(size(mov_y_and))
        z1min=z1_map(mov_y_and(i,1));
        z1max=z1_map(mov_y_and(i,2));
        for j=1:max(size(mov_x_rit))
            m=m+1;
            r=r+1;
            count=count+1;
            z2min=z2_map(mov_x_rit(j,1));
            z2max=z2_map(mov_x_rit(j,2));

[M1,M2,rpm1,rpm2,M1_rms,M2_rms,rpm1_rms,rpm2_rms]=Azionamenti
_Piano_Cartesiano_map(z1min,z1max,z2min,z2max,deltaYmin,delta
Ymax,campionamento,tempo_ciclo);
            Momento_y_and(r,1)=max(abs(M1));
            Momento_y_rms_and(r,1)=max(abs(M1_rms));
            Momento_x_rit(m,1)=max(abs(M2));
            Momento_x_rms_rit(m,1)=max(abs(M2_rms));
            Revolution_y_and(r,1)=max(abs(rpm1));
            Revolution_y_rms_and(r,1)=max(abs(rpm1_rms));
            Revolution_x_rit(m,1)=max(abs(rpm2));
            Revolution_x_rms_rit(m,1)=max(abs(rpm2_rms));
            general_mov(count,1)=z2min;
            general_mov(count,2)=z2max;
            general_mov(count,3)=z1min;
            general_mov(count,4)=z1max;
            general_mov(count,5)=deltaYmin;
            general_mov(count,6)=deltaYmax;
            general_mov(count,7)=Momento_x_rit(m,1);
            general_mov(count,8)=Momento_y_and(r,1);
        end
    end
end

%% Ritorno X e Ritorno Y
s=0;
i=0;
j=0;
for s=1:max(size(deltaY_map))
    deltaYmin=0;
    deltaYmax=deltaY_map(s,1);

```

```

for i=1:max(size(mov_y_rit))
    z1min=z1_map(mov_y_rit(i,1));
    z1max=z1_map(mov_y_rit(i,2));
    for j=1:max(size(mov_x_rit))
        m=m+1;
        f=f+1;
        count=count+1;
        z2min=z2_map(mov_x_rit(j,1));
        z2max=z2_map(mov_x_rit(j,2));

[M1,M2,rpm1,rpm2,M1_rms,M2_rms,rpm1_rms,rpm2_rms]=Azionamenti
_Piano_Cartesiano_map(z1min,z1max,z2min,z2max,deltaYmin,delta
Ymax,campionamento,tempo_ciclo);
        Momento_y_rit(f,1)=max(abs(M1));
        Momento_y_rms_rit(f,1)=max(abs(M1_rms));
        Momento_x_rit(m,1)=max(abs(M2));
        Momento_x_rms_rit(m,1)=max(abs(M2_rms));
        Revolution_y_rit(f,1)=max(abs(rpm1));
        Revolution_y_rms_rit(f,1)=max(abs(rpm1_rms));
        Revolution_x_rit(m,1)=max(abs(rpm2));
        Revolution_x_rms_rit(m,1)=max(abs(rpm2_rms));
        general_mov(count,1)=z2min;
        general_mov(count,2)=z2max;
        general_mov(count,3)=z1min;
        general_mov(count,4)=z1max;
        general_mov(count,5)=deltaYmin;
        general_mov(count,6)=deltaYmax;
        general_mov(count,7)=Momento_x_rit(m,1);
        general_mov(count,8)=Momento_y_rit(f,1);
    end
end
end

Momento_x=[Momento_x_and;Momento_x_rit];
Momento_x_max=max(Momento_x);
fprintf('La coppia massima nell"asse x è %8.2f Nm
\r',Momento_x_max)
figure(1)
plot(Momento_x)
ylabel('Momento asse X [Nm]')
Momento_x_rms=[Momento_x_rms_and;Momento_x_rms_rit];
Momento_x_rms_mean=mean(Momento_x_rms);
fprintf('La coppia rms media nell"asse x è %8.2f Nm
\r',Momento_x_rms_mean)
figure(2)
plot(Momento_x_rms)
ylabel('Momento rms asse X [Nm]')

Revolution_x=[Revolution_x_and;Revolution_x_rit];
Revolution_x_max=max(Revolution_x);
fprintf('La velocità angolare massima nell"asse x è %8.0f
giri/minuto \r',Revolution_x_max)

```

```

Revolution_x_rms=[Revolution_x_rms_and;Revolution_x_rms_rit];
Revolution_x_rms_mean=mean(Revolution_x_rms);
fprintf('La velocità angolare rms media nell"asse x è %8.0f
giri/minuto \r',Revolution_x_rms_mean)

```

```

Momento_y=[Momento_y_and;Momento_y_rit];
Momento_y_max=max(Momento_y);
fprintf('La coppia massima nell"asse y è %8.2f Nm
\r',Momento_y_max)
figure(3)
plot(Momento_y)
ylabel('Momento asse Y [Nm]')
Momento_y_rms=[Momento_y_rms_and;Momento_y_rms_rit];
Momento_y_rms_mean=mean(Momento_y_rms);
fprintf('La coppia rms media nell"asse y è %8.2f Nm
\r',Momento_y_rms_mean)
figure(4)
plot(Momento_y_rms)
ylabel('Momento rms asse Y [Nm]')

```

```

Revolution_y=[Revolution_y_and;Revolution_y_rit];
Revolution_y_max=max(Revolution_y);
fprintf('La velocità angolare massima nell"asse y è %8.0f
giri/minuto \r',Revolution_y_max)
Revolution_y_rms=[Revolution_y_rms_and;Revolution_y_rms_rit];
Revolution_y_rms_mean=mean(Revolution_y_rms);
fprintf('La velocità angolare rms media nell"asse y è %8.0f
giri/minuto \r',Revolution_y_rms_mean)

```

```

fprintf('Il numero di combinazioni sono %f \r',count)
toc

```

## Appendice H

### SCRIPT MATLAB RELATIVO ALLA MAPPATURA DELLA ROTAZIONE DELLA TORRETTA

```
clear,clc
tic
%%-%%-%%-%%-%%--% MAPPATURA %--%-%%-%%-%%-%%
campionamento=50;
tempo_ciclo=2.2;
z1_map=linspace(0,472,25)';
z2_map=linspace(0,266,25)';
deltaY_map=[0;pi];
count=0;

n=0;
for i=1:size(z1_map)
    z1min=z1_map(i,1);
    z1max=z1_map(i,1);
    for j=1:size(z2_map)
        n=n+1;
        z2min=z2_map(j,1);
        z2max=z2_map(j,1);
        deltaYmin=0;
        deltaYmax=deltaY_map(2,1);

[M,rpm,M_rms,rpm_rms]=Azionamenti_Rotazione_map(deltaYmin,deltaYmax,z1min,z1max,z2min,z2max,campionamento,tempo_ciclo);
Momento_180(:, :, n)=M;
Momento_rms_180(:, :, n)=M_rms;
Revolution_180(:, :, n)=rpm;
Revolution_rms_180(:, :, n)=rpm_rms;
Graf_x_180(j,1)=z2_map(j,1);
Graf_y_180(i,1)=z1_map(i,1);
Graf_Momento_180(j,i)=max(abs(Momento_180(:, :, n)));

Graf_Momento_rms_180(j,i)=max(abs(Momento_rms_180(:, :, n)));

Graf_Revolution_180(j,i)=max(abs(Revolution_180(:, :, n)));

Graf_Revolution_rms_180(j,i)=max(abs(Revolution_rms_180(:, :, n)));
        count=count+1;
    end
end
```

```

figure(1)
surf(Graf_x_180,Graf_y_180,Graf_Momento_180')
xlabel('X'), ylabel('Y'), zlabel('Momento massimo asse
rotazione torretta')

%-----
-----
figure(2)
surf(Graf_x_180,Graf_y_180,Graf_Momento_rms_180')
xlabel('X'), ylabel('Y'), zlabel('Momento massimo rms asse
rotazione torretta')

%-----
-----
figure(3)
surf(Graf_x_180,Graf_y_180,Graf_Revolution_180')
xlabel('X'), ylabel('Y'), zlabel('Revolution massimo 180')

%-----
-----
figure(4)
surf(Graf_x_180,Graf_y_180,Graf_Revolution_rms_180')
xlabel('X'), ylabel('Y'), zlabel('Revolution massimo 180
rms')

Momento_max=max(max(Graf_Momento_180));
fprintf('La coppia massima è %8.2f Nm \r',Momento_max)

Momento_rms_mean=mean(mean(Graf_Momento_rms_180));
fprintf('La media delle coppie rms è %8.2f Nm
\r',Momento_rms_mean)

Revolution_max=max(max(Graf_Revolution_180));
fprintf('La velocità angolare massima è %8.0f giri/minuto
\r',Revolution_max);

Revolution_rms_mean=mean(mean(Graf_Revolution_rms_180));
fprintf('La media delle velocità angolari rms media è %8.0f
giri/minuto \r',Revolution_rms_mean);

fprintf('Il numero di combinazioni sono %f \r',count)
toc
Momento_y_max=max(Momento_y);
fprintf('La coppia massima nell"asse y è %8.2f Nm
\r',Momento_y_max)
figure(3)
plot(Momento_y)
ylabel('Momento asse Y [Nm]')
Momento_y_rms=[Momento_y_rms_and;Momento_y_rms_rit];
Momento_y_rms_mean=mean(Momento_y_rms);

```

```

fprintf('La coppia rms media nell"asse y è %8.2f Nm
\r',Momento_y_rms_mean)
figure(4)
plot(Momento_y_rms)
ylabel('Momento rms asse Y [Nm]')

Revolution_y=[Revolution_y_and;Revolution_y_rit];
Revolution_y_max=max(Revolution_y);
fprintf('La velocità angolare massima nell"asse y è %8.0f
giri/minuto \r',Revolution_y_max)
Revolution_y_rms=[Revolution_y_rms_and;Revolution_y_rms_rit];
Revolution_y_rms_mean=mean(Revolution_y_rms);
fprintf('La velocità angolare rms media nell"asse y è %8.0f
giri/minuto \r',Revolution_y_rms_mean)

fprintf('Il numero di combinazioni sono %f \r',count)
toc

```



## Bibliografia

- [1] B. Siciliano, L.Sciavicco, L. Villani, G. Oriolo, *Robotica. Modellistica, pianificazione e controllo*. McGraw-Hill.
- [2] G. Legnani, M. Tiboni, R. Adamini, D. Tosi. *Meccanica degli azionamenti. Volume 1: azionamenti elettrici*. Progetto Leonardo.
- [3] Alberto Martini. *Comportamento elastodinamico di meccanismi in catena chiusa bilanciati: analisi numerica e sperimentale di un quadrilatero articolato*. Dottorato di ricerca in Meccanica e Scienze Avanzate dell'Ingegneria (DIMSAI)
- [4] Holly Moore, *Matlab per l'Ingegneria*, Pearson Prentice hall.
- [5] E. Funaioli, A. Maggiore, U. Meneghetti, *Lezioni di meccanica applicata alle macchine. Prima parte: fondamenti di meccanica delle macchine*. Pàtron Editore.
- [6] E. Funaioli, A. Maggiore, U. Meneghetti, *Lezioni di meccanica applicata alle macchine. Secondo parte: elementi di meccanica degli azionamenti*. Pàtron Editore.
- [7] A. Rovetta. *Fondamenti di robotica*. Hoepli.
- [8] G. Legnani. *Robotica industriale*. Casa Editrice Ambrosiana.
- [9] Po-Yang Lin, Win-Bin Shieh, Dar-Zen Chen. *Design of a Gravity-Balanced General Spatial Serial-Type Manipulator*. Journal of Mechanisms and Robotics.
- [10] Sunil K. Agrawal, Abbas Fattah. *Gravity-balancing of spatial robotic manipulators*. Science Direct.
- [11] Alberto Martini, Marco Troncossi, Marco Carricato, Alessandro Rivola. *Elastodynamic behavior of balance closed-loop mechanisms: numerical analysis of a four-bar linkage*. Springer Science.
- [12] Subbiah Mahalingam, Anand M. Sharan. *The optimal balancing of the robotic manipulators*.



## **Ringraziamenti**

Un ringraziamento sentito al Professore Ingegnere Alessandro Rivola e al Dottore Ingegnere Alberto Martini per la disponibilità e la pazienza che mi hanno donato durante lo svolgimento della tesi.

Ringrazio l'azienda Paglierani s.r.l., in particolare l'ufficio tecnico e l'ingegnere Lorenzo Magnani per l'occasione che mi hanno dato di realizzare questa tesi nella loro accogliente sede.

Il percorso universitario che sto per concludere è una delle tante strade che ho avuto l'immensa fortuna di poter percorrere in questi ultimi anni. La tesi è stata dedicata a chi per primo ha messo energie umane ed economiche per far sì che i miei piedi e la mia mente potessero percorrere questo cammino. Ma in quanti in modo straordinario mi hanno accompagnato durante tutto il tragitto? Non posso, non è mio diritto, quindi, sprecare queste righe per una semplice, seppur sempre efficace, elencazione di persone, di cose fatte e dette con ognuna di essa. Nella mia bassezza umana e morale, con l'innocenza di un bambino mi ritrovo a ripercorrere questi ultimi anni riavvolgendo una pellicola densa di situazioni, emozioni, luoghi, errori, paure e desideri. Allora mi ritrovo senza parole davanti al dono che Qualcuno o il caso mi ha riservato catapultandomi in questo mondo, rimango attonito davanti alla bellezza e alla verità incorrotta che mi si è presentata davanti agli occhi e di cui ho potuto e posso godere, cado in ginocchio davanti alla grandezza delle relazioni umane di cui ogni giorno ne subisco amorevolmente la profondità. La mia intima gratitudine si esprime solo attraverso un pianto istintivo e incontrollato.

Grazie a tutti.