



POLITECNICO DI MILANO

FACOLTÀ DI INGEGNERIA INDUSTRIALE
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Ottimizzazione e Progettazione di un robot 5 gdl per stampa 3D

Relatore

Prof. Ing. Hermes Giberti

Tesi di laurea di

Luca Sbaglia
Matricola: 804573

Anno Accademico 2014/2015

Alla mia famiglia.

Ringraziamenti

Desidero ringraziare il prof. Giberti per avermi dato la possibilità di partecipare ad un bellissimo progetto in cui ho potuto finalmente mettere in pratica anni di studio universitari ed arrivare ad apprezzare il lavoro da ingegnere. È stato sempre disponibile ed insieme a lui Enrico Fiore e Davide Ferrari che mi hanno aiutato moltissimo e senza i quali non avrei potuto compiere questo lavoro. Ringrazio tutti quelli che hanno partecipato al progetto in forme diverse e senza i quali non si sarebbe potuto proseguire.

Ringrazio la mia famiglia, in particolare mio papà e mia mamma che non mi hanno mai fatto mancare niente e mio fratello Daniele a cui tengo molto. Ringrazio mio nonno che per me è unico.

Ringrazio i mie zii che mi hanno ospitato al mio arrivo qui a Milano e mi hanno seguito in questi anni. A loro, a Massimo e Chiara grazie.

Voglio ringraziare tutti i miei amici che sono stati fondamentali per che io arrivassi fino a qui e a cui non riesco mai dare quello che loro danno a me. In particolare ringrazio Sarin e Patrizio che sono stati con me fin dall'inizio.

A tutti voi. Vi voglio bene.

Milano, settembre 2015

INDICE

Introduzione	1
1 Stato dell'arte	3
1.1 Introduzione	3
1.2 Additive Manufacturing	3
1.2.1 Tecniche AM	4
1.2.2 Materiali per AM	8
1.2.3 Applicazioni	10
1.3 Struttura e cinematica delle stampanti 3D	11
1.3.1 3D Systems	13
1.3.2 Stratasys	14
1.3.3 ExOne	17
1.3.4 Arcam	18
1.3.5 Optomec	18
1.3.6 Stampanti commerciali	20
1.4 Limiti dell'AM	21
1.5 Progetto Efesto	24
2 Cinematica	27
2.1 Introduzione	27
2.2 Soluzione Ibrida	27
2.3 Analisi Cinematica del Linear Delta	32
2.3.1 Cinematica inversa e diretta	33
2.3.2 Analisi delle velocità	36
2.4 Analisi Cinematica dell'Agile Eye	38
2.4.1 Analisi delle velocità	41
2.4.2 Approccio geometrico	42
3 Ottimizzazione Cinematica	45
3.1 Introduzione	45
3.2 Spazio di Lavoro	45
3.3 Ottimizzazione del Linear Delta	47
3.3.1 Scelta dei parametri	47
3.3.2 Algoritmo genetico	48
3.3.3 Funzione di costo	49
3.3.4 Vincoli	50
3.3.5 Ottimizzazione adimensionale	54
3.3.6 Ottimizzazione dimensionale	62

3.4	Sintesi cinematica dell'Agile Eye	66
3.4.1	Configurazioni Singolari	69
4	Analisi Dinamica	71
4.1	Introduzione	71
4.2	Modello	71
4.3	Dimensionamento del gruppo motoriduttore	73
4.3.1	Procedimento	73
4.3.2	Coppia resistente	76
4.3.3	Legge di moto	77
4.3.4	Risultati e scelta gruppo motoriduttore	79
4.4	Scelta delle Guide Lineari	80
4.5	Risultati Studio Dinamico	87
5	Progettazione	91
5.1	Introduzione	91
5.2	Progetto Stampante Efesto	91
5.3	Linear Delta	92
5.3.1	Materiale	93
5.3.2	Link	93
5.3.3	Vincolo Universale	96
5.3.4	Angolari	102
5.3.5	Sensore di posizione	103
5.4	Agile Eye	104
5.5	Sistema di Controllo	106
5.5.1	Anelli di controllo PID	108
5.5.2	Schema Elettrico	109
5.6	Costi	113
	Conclusioni	115
A	Accenni di robotica	117
A.1	Robot seriali e paralleli	117
A.2	Cinematica diretta ed inversa	118
A.3	Moltiplica delle forze e delle velocità	120
A.4	Configurazioni Singolari	121
B	Disegni e schede tecniche	123
B.1	Disegni Tecnici	124
B.2	Dati Tecnici Motore elettrico HG-KR43B	144
B.3	Dati Tecnici Guida Lineare ELM 80-SP	146
B.4	Dati Tecnici Riduttore TR 080 1 10 LOW 50C1 CD14 S5 OR SB KE	147
	Bibliografia	151

ELENCO DELLE FIGURE

1.1	Tecniche AM 1	5
1.2	Tecniche AM 3	6
1.3	Tecniche AM 2	7
1.4	Tecnica CLIP	8
1.5	Soluzioni ibride	8
1.6	Tecniche AM per metalli	9
1.7	Applicazioni in campo aerospaziale	10
1.8	Applicazioni in campo automotive e biomedico	11
1.9	Tecnica SLA della 3D Systems	13
1.10	Specchi mobili	14
1.11	Stampanti della 3D Systems	15
1.12	Tecnica MJM della 3D Systems	15
1.13	Tecnica FDM della Stratasys	16
1.14	Gantry System	17
1.15	Stampanti ExOne	18
1.16	Tecnica EBM dell'Arcam	19
1.17	Tecnica AerosolJet	19
1.18	Tecnica LENS dell'Optomec	20
1.19	LENS 850-R	21
1.20	Delta Maker	22
1.21	Effetto staircase	23
1.22	Angolo di deposizione	24
1.23	Metodi per evitare l'utilizzo di materiale di supporto	25
1.24	Estrusore e rotazione relativa piattaforma-vettore peso	25
2.1	Soluzioni a cinematica parallela con 5 gdl	28
2.2	Delta Robot	29
2.3	Robot <i>Star</i> e <i>Linear Delta</i>	30
2.4	Robot <i>Orthoglide</i> e <i>Tricept</i>	30
2.5	Polsi sferici	32
2.6	Schema PUS del <i>Linear Delta</i>	33
2.7	Modello del <i>Linear Delta</i>	34
2.8	Schema dell' <i>Agile Eye</i> con 2 gdl	38
2.9	Modello dell' <i>Agile Eye</i>	39
2.10	Approccio geometrico	42
2.11	Disegno dell'equazione cinematica dell'approccio geometrico	43
3.1	Compensazione delle traslazioni effetto delle rotazioni dell' <i>Agile Eye</i>	46

3.2	Nuovo spazio di lavoro	47
3.3	Parametri dell'ottimizzazione	48
3.4	Calcolo dello spazio di lavoro del <i>Linear Delta</i>	51
3.5	Rotazioni dei giunti universali	52
3.6	Moltiplica delle velocità e forze	53
3.7	Singolarità del <i>Linear Delta</i>	54
3.8	Spazi di lavoro al variare di α_2 e τ	56
3.9	Convergenza dell'algoritmo genetico per diversi valori di α_2 e $\tau_{f,max} = \tau_{v,max} = 3$	57
3.10	Ottimizzazione adimensionale dei parametri α , d ed l al variare di α_2	58
3.11	Moltiplica delle forze con $\alpha_2 = 60^\circ$	59
3.12	Moltiplica delle forze e delle velocità con $\alpha_2 = 30$, $\tau_{f,max} = \tau_{v,max} = 3$	60
3.13	Convergenza dell'algoritmo genetico nell'ottimizzazione dimensionale	64
3.14	Moltiplica delle forze e delle velocità al variare di α	65
3.15	Spazio di lavoro finale del <i>Linear Delta</i>	66
3.16	Valori finali di moltiplica del <i>Linear Delta</i>	67
3.17	Posizione dei motori dell' <i>Agile Eye</i>	68
3.18	Configurazioni singolari dell' <i>Agile Eye</i>	69
4.1	Modello Adams del <i>Linear Delta</i>	72
4.2	Vincoli del modello	74
4.3	Sistema motore-riduttore-guida-slider	76
4.4	Punti scelti per lo studio dinamico in Adams	78
4.5	α per i diversi motori rispetto a β_{max}	83
4.6	Rapporti di trasmissione possibili per i diversi motori	84
4.7	Guide Rollon Serie SP e CL	85
4.8	Ingombro del <i>Linear Delta</i> e forze e momenti sugli slider	86
4.9	Soluzione Ergonomica	86
4.10	Punti per lo studio delle reazioni vincolari	87
5.1	Stampante Efesto	92
5.2	Link	94
5.3	Grafico pv	96
5.4	Vincolo universale sullo slider	97
5.5	Vincolo universale sulla piattaforma	98
5.6	Vincolo universale sullo slider esploso	98
5.7	Esploso del vincolo universale sulla piattaforma	99
5.8	Limite di α_2	99
5.9	Forze esercitate dalle boccole	100
5.10	Sezioni critiche del perno	101
5.11	Ghiera e Snodo Sferico	102
5.12	Angolari	102
5.13	Esploso Angolare-Piastra-Guida Lineare	103
5.14	Piastra Superiore e Piattaforma	103
5.15	Sensore Ottico	104
5.16	<i>Agile Eye</i>	105
5.17	Schema del sistema di controllo	107
5.18	Controllo offline e real time	107

5.19	Controllo in anello chiuso	108
5.20	Anelli di controllo del motore elettrico	109
5.21	Esemplificazione dello schema elettrico	110
5.22	Schema elettrico del <i>Linear Delta</i>	112
A.1	Catena cinematica aperta e chiusa	118
A.2	Ellisoide di manipolabilità in velocità	120
A.3	Configurazioni Singolari	122

ELENCO DELLE TAVOLE

1.1	Proprietà meccaniche di prodotti stampati con tecniche AM	9
1.2	Aziende e tecnologie per stampa 3D	12
1.3	Caratteristiche tecniche delle stampanti 3D	23
2.1	Simboli usati nella risoluzione del problema cinematico.	34
3.1	Spazi di lavoro equivalenti	47
3.2	Range dei parametri dello studio adimensionale	55
3.3	Risultati dell'ottimizzazione adimensionale	61
3.4	Range dei parametri dell'ottimizzazione dimensionale	63
3.5	Risultati dello studio dimensionale	64
3.6	Moltiplica delle forze per il motore 2 al variare di θ	68
4.1	Dati del modello Adams	72
4.2	Motore Mitsubishi HG-KR 43(B), riduttore Bonfiglioli TR 080 1_10	80
4.3	Risultati di coppia, accelerazione, velocità e β_{max}	81
4.4	Motori Brushless Mitsubishi Electric	82
4.5	Guida Rollon ELM 80 SP, carichi dinamici massimi consigliati	87
4.6	Forze e momenti sulle guide	88
4.7	Risultati dello studio dinamico nei punti S1, S2 ed S3 dei 3 parallelogrammi	89
5.1	Alluminio Anticorodal 6012	93
5.2	Snodo Sferico SKF SA8E	95
5.3	Boccola SKF PBMF 253516 M1G1	97
5.4	Acciaio C40	101
5.5	Sensore ottico <i>Heidenhain LIC 4193M</i>	104
5.6	Tensione e corrente in ingresso ai componenti del circuito	113
5.7	Costi dei componenti acquistati	113
B.1	Tavola-01	124
B.2	Tavola-02	125
B.3	Tavola-03	126
B.4	Tavola-04	127
B.5	Tavola-05	128
B.6	Tavola-06	129
B.7	Tavola-07	130
B.8	Tavola-08	131
B.9	Tavola-09	132
B.10	Tavola-10	133

B.11 Tavola-11	134
B.12 Tavola-12	135
B.13 Tavola-13	136
B.14 Tavola-14	137
B.15 Tavola-15	138
B.16 Tavola-16	139
B.17 Tavola-17	140
B.18 Tavola-18	141
B.19 Tavola-19	142
B.20 Tavola-20	143

Sommario

L'Additive Manufacturing con in particolare la stampa 3D è una tecnologia oggi giorno sotto i riflettori mediatici ed in grande crescita sia da un punto di vista scientifico che industriale. Ad essa sono però associate una serie di problematiche tra cui gli elevati costi delle stampanti per la produzione di oggetti in materiale metallico dovuti all'uso di tecnologie laser ed EBM, l'uso di materiale di supporto necessario a sorreggere il pezzo durante la realizzazione e la qualità finale del prodotto non sempre elevata a causa della stratificazione in layer dei prodotti che genera il comunemente chiamato effetto scalino.

La presente tesi si colloca all'interno di questo scenario e tratta della progettazione di una stampante 3D innovativa basata sull'uso di una tecnologia MIM ed una piattaforma mobile con 5 gdl. Il lavoro di tesi affrontata la progettazione della piattaforma partendo dalla scelta dell'architettura cinematica idonea a garantire le specifiche di funzionamento per poi procedere con l'ottimizzazione cinematica di tale architettura attraverso un algoritmo genetico in modo da ottenere i parametri cinematici adatti a garantire la copertura dello spazio di lavoro. Successivamente viene descritta la progettazione costruttiva di dettaglio del sistema affiancata da simulazioni dinamiche al fine di ottenere un corretto dimensionamento degli organi più sollecitati. Infine viene presentata l'architettura di controllo scelta e la progettazione dello schema elettrico del sistema.

Parole chiave: robot a cinematica parallela, linear delta, agile eye, ottimizzazione cinematica, algoritmo genetico, analisi dinamica, sistema di controllo

Abstract

Additive Manufacturing with specific attentions to 3D printing is a technology under the media spotlights nowadays in great growth from both a scientific and industrial point of view. It has some problems related to the high costs for the production of metal parts due to the use of laser and EBM technologies, the use of support material needed to bear the piece during the production and the not always great quality of the final product due to the stratification process based on layers which leads to the so called staircase effect.

This thesis works in this background and it's about the design of a innovative 3D printer based on a MIM technology and a mobile platform with 5 Dofs. This works faces the platform design starting from the choice of the suitable kinematic architecture in order to guarantee the design specifications and after it proceeds with the kinematic optimization of the structure using a genetic algorithm and so obtain the kinematic parameters in order to cover the machine workspace. Later it's developed the structural design together with dynamic simulations in order to obtain the right sizing of the machine critical parts. In the end it's shown the choice of the control architecture and the design of the electric scheme.

Key words: parallel robot, linear delta, agile eye, kinematic optimization, genetic algorithm, dynamic analysis, control system

Introduzione

Questo lavoro di tesi nasce da un progetto autofinanziato dai ricercatori del dipartimento di meccanica del Politecnico di Milano volto ad inserirsi in un contesto di costante crescita delle tecniche di Additive Manufacturing. Obiettivo del progetto, denominato Efesto, è costruire una stampante 3D basata su una tecnologia MIM in grado di stampare materiale metallico misto ad un binder, legante polimerico, successivamente sottoposto ad un processo di sinterizzazione. Questa soluzione tecnica si prefigge l'obiettivo di poter stampare pezzi metallici ad un costo inferiore delle odierne stampanti 3D basate su tecnologia laser o EBM. Gli elevati costi di stampa oltre che alle tecnologie utilizzate sono legati all'uso di materiale di supporto che serve a sorreggere il pezzo durante la sua realizzazione. L'Additive Manufacturing presenta anche problemi legati alla qualità del prodotto finale per via del processo basato su una tecnica di stratificazione in layer dei prodotti che genera il comunemente chiamato effetto scalino.

Il progetto della stampante prevede l'impiego una testa di estrusione fissa che deposita il materiale sopra una piattaforma mobile. La tecnologia MIM proposta prevede l'uso di un estrusore dal peso complessivo di circa 25[Kg]; spostare e posizionare precisamente e velocemente tale pezzo sarebbe particolarmente gravoso per il sistema, ed è per questo che si sceglie di avere una piattaforma mobile ed una testa di estrusione fissa, scelta in controtendenza con le attuali stampanti 3D che utilizzano solitamente sistemi di movimentazione con 3 gradi di libertà di traslazione di cui uno solo conferito alla piattaforma che può spostarsi verticalmente. Per affrontare le problematiche di costi e qualità del prodotto descritte in precedenza si ha bisogno di sviluppare un'architettura cinematica che conferisca alla piattaforma possibilità di movimentazione maggiori rispetto alle odierne stampanti industriali. Il progetto si basa su una piattaforma mobile con 5 gdl di cui due rotazionali, rollio e beccheggio. Questi ulteriori due gradi di libertà permettono di poter affrontare i problemi legati all'uso del materiale di supporto e all'effetto gradino.

Di seguito vengono descritti i passi fondamentali attorno ai quali è stato sviluppato questo lavoro, in dettaglio ogni singola fase viene approfondita nei cinque capitoli che costituiscono il corpo centrale di questo documento.

Il lavoro di tesi inizia con la scelta dell'architettura cinematica da conferire alla piattaforma. Tale scelta è figlia dello studio sullo stato dell'arte delle odierne macchine per stampa 3D, nel particolare delle loro tecniche di movimentazione, e della necessità di soddisfare le esigenze di una nuova tecnica produttiva. Sull'architettura cinematica, composta da due robot a cinematica parallela posti in serie, viene svolto un lavoro di analisi dal quale si ricavano le equazioni di cinematica inversa e diretta.

Viene poi effettuato un lavoro di ottimizzazione cinematica in modo da garantire la copertura di uno specifico spazio di lavoro insieme a specifiche qualità prestazionali del robot. Da progetto è richiesto uno spazio di lavoro cubico di lato 100[mm] con possi-

bilità di orientamento di rollio e beccheggio di $\pm 45^\circ$. Lo studio cinematico e la fase di ottimizzazione sono state eseguite attraverso l'utilizzo del software *Matlab*, in particolare viene utilizzata una funzione mono obiettivo per ricavare i parametri cinematici della struttura.

Partendo dai dati ricavati in fase di ottimizzazione è stato possibile effettuare la progettazione costruttiva di dettaglio della macchina affiancando a questo lavoro un'analisi dinamica necessaria per arrivare a dimensionare correttamente i componenti maggiormente sollecitati del sistema. Per l'analisi dinamica si è utilizzato il software multibody *Adams* mentre per la progettazione si è utilizzato il programma *SolidWorks*. Insieme alla fase progettuale viene presentata l'architettura di controllo della macchina insieme al suo schema elettrico. Il sistema di controllo è stato acquistato facendo riferimento ad un'unica casa produttrice in maniera da rendere la soluzione proposta facilmente implementabile a livello industriale.

La tesi si conclude sottolineando i risultati raggiunti e dando alcuni spunti per sviluppi futuri.

Capitolo 1

Stato dell'arte

1.1 Introduzione

L'Additive Manufacturing è un processo produttivo realizzabile attraverso differenti metodi legati a diverse tecniche di movimentazione. In questo capitolo viene data un'introduzione sul mondo dell'AM, sulle sue diverse tecniche di realizzazione, di stampa 3D nel particolare, e si prosegue studiando le diverse strutture cinematiche delle stampanti di importanti aziende del settore. Alla fine viene introdotto il progetto Efesto all'interno del quale si introduce il lavoro di questa tesi.

1.2 Additive Manufacturing

L'Additive Manufacturing viene definito dall'ASTM F42(American Society for Testing and Materials) come: “process of joining materials to make objects from three-dimensional (3D) model data, usually layer upon layer, as opposed to subtractive manufacturing methodologies”. Non esiste ad oggi una definizione globalmente riconosciuta per questa tecnica di produzione. L'ASTM sta cercando dal 2009 di standardizzare la terminologia di questo fenomeno e la definizione data rende l'idea di quello di cui si sta parlando. La nascita di questa tecnica produttiva, o meglio di queste tecniche produttive, avviene all'inizio degli anni '80 con il suo sviluppo presso il Massachusetts Institute of Technology e la sua prima commercializzazione attraverso la compagnia 3D Systems che presentò la prima macchina di questa genere all'Autofact show di Detroit nel novembre del 1987 [1]. Di certo quella inizialmente proposta era una delle varianti di questa tecnologia che ad oggi lavora con diversi materiali in diversi modi. Per questa tecnologia si prospetta un fatturato di circa 5 miliardi di dollari nel 2015 e circa 8.5 nel 2020. Cifre per ora irrisorie se comparate ai circa 10.000 miliardi di dollari delle tecniche tradizionali ma comunque non irrilevanti se si considerano i circa 8 miliardi del mercato della robotica [2]. Le più grandi aziende del settore risultano essere statunitensi ed europee, ed è proprio qui che troviamo i più grandi mercati per questo settore. In termini di attività per ora il settore di maggiore applicazione è la prototipazione, seguita da *hobby and DYT*(design it yourself), gadget, arte e moda, modelli in scala ed altro(3DHubs.com). La produzione industriale entra nel mondo dell'AM attraverso la prototipazione, che permette di velocizzare tutti i processi di progettazione ed ingegnerizzazione grazie alla costruzione di modelli che possono essere osservati e toccati con mano, provati nell'immediato facilitando il riconoscimento di eventuali errori, mancanze e possibili miglioramenti; inoltre

vi è la produzione diretta di componenti meccaniche che è una delle sfide più importanti per questo settore. L'AM non può e non sembra potrà competere mai nella produzione di grandi quantità di pezzi con le tecniche classiche di fabbricazione ma sulla piccola scala può fare la differenza [3]. L'uso di tecniche AM risulta vantaggioso in particolar modo per:

- produzione di piccoli lotti od unitaria
- personalizzazione del prodotto
- produzione di pezzi dalla forma complessa e multimateriali

La possibilità di competere solo per produzione di piccoli lotti risiede nel fatto che un grande vantaggio dell'AM sta nel ridotto lead time e tempo di ingegnerizzazione. Il processo produttivo però non è molto veloce nell'additive, si ha bisogno di solidificare strati di materiale uno sopra l'altro; se la produzione da fare è dell'ordine del migliaio di pezzi si hanno poche speranze di poter competere con un processo produttivo ed ottimizzato basato su tecniche CNC o simili.

La facile personalizzazione del prodotto deriva dalle stesse caratteristiche sopra descritte; per modificare un prodotto basta modificarne il CAD senza dover modificare la produzione del prodotto, questo fa capire anche perchè questa tecnologia è adatta a produrre pezzi dalla forma complessa, pezzi che con tecnologie classiche sarebbe difficile se non impossibile realizzare; nel proseguo del testo sarà più comprensibile quanto appena detto.

Il processo produttivo ha le sue limitazioni; l'Additive Manufacturing o stampa 3D parte da disegni CAD e produce oggetti in 3 dimensioni strato dopo strato secondo una logica preimplementata nei programmi della stampante, non necessariamente tutte le forme immaginabili sono stampabili e anche lo fossero il risultato finale, tolleranze geometriche, finitura superficiale ed altro, può essere oggetto di diverse variazioni. Rimangono comunque dei vantaggi rispetto alle tecniche classiche.

1.2.1 Tecniche AM

Le tecniche produttive di Additive Manufacturing sono come la tecnologia stessa di non facile classificazione ed ad oggi non precisamente standardizzate; si possono trovare nomi diversi per stesse tecnologie. Di seguito si andranno a distinguere le diverse tecniche a seconda dello stato e forma del materiale usato prima della stampa dell'oggetto finale [4]. In comune per tutte le tecniche rimane la partenza da un disegno CAD da cui si ricavano le sezioni da stampare una dietro l'altra fino ad ottenere l'oggetto finale. Il materiale usato può essere:

liquido: Tra le tecniche basate sull'uso di materiale allo stato liquido la stereolitografia, SLA, è stata la prima tecnica AM commercializzata in assoluto, ed è caratterizzata dalla solidificazione selettiva di una resina liquida attraverso della luce ultravioletta(UV). Una volta solidificato uno strato la piattaforma di lavoro scende facendo ricoprire lo strato superiore da altro liquido permettendo la continuazione del processo. Ogni strato aderisce a quello inferiore arrivando così a creare l'oggetto finale. Oltre ad oggetti polimerici sono state inventate delle varianti per produrre oggetti ceramici o metallici grazie alla sospensione di particelle di tali materiali in un monomero solidificabile con l'aiuto dei raggi UV. Esiste anche

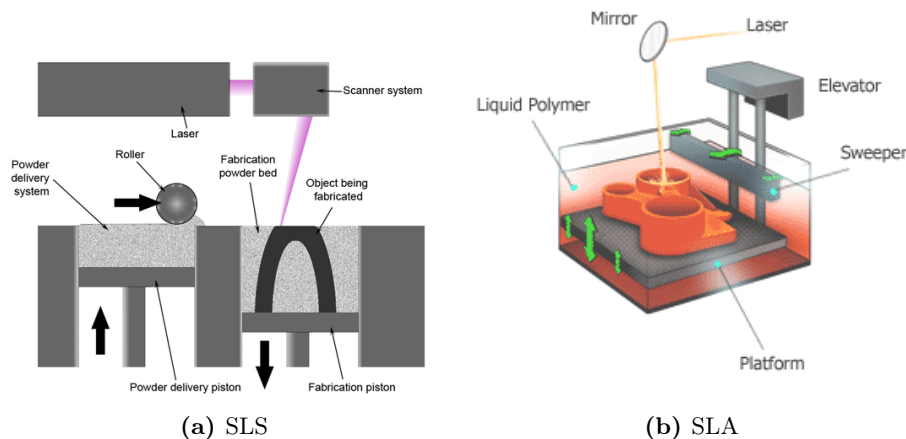


Figura 1.1: Tecniche AM 1

una variante basate sull'uso di specchi digitali, DMD(digital micromirror device), che permette di evitare l'utilizzo di un laser che deve andare selettivamente ad indurire specifiche zone dello strato liquido ma permette di eseguire l'operazione contemporaneamente per tutto lo strato liquido con notevole risparmio di tempo. Multi-Jet Modelling(MJM) è una tecnica molto simile alla classica stampa 2D; qui una testa rilascia del materiale polimerico o ceramico fotosensibile, di seguito una lampada UV provvede ad indurire il materiale depositato. Anche in questo caso ogni strato creato aderisce al successivo fino al completamento del pezzo. Un'altra tecnica interessante anche se non commercializzata è la Rapid Freeze Prototyping(RFP) che consiste nel depositare selettivamente un materiale allo stato liquido e congelarlo immediatamente. Strati successivi sfruttano gli strati sottostanti per il loro raffreddamento e questo permette nel contatto non solo il congelamento del materiale depositato ma anche che ogni strato si leghi a quello sottostante. Questa tecnica è stata sperimentata con dell'acqua come materiale da indurire e sembra essere promettente per stampi per colata.

filo: La tecnica più diffusa per la stampa di materiale sotto forma di fili è la FDM, Fused Deposition Modeling, inventata, brevettata e commercializzata da Scott Crump, cofondatore dell'azienda Stratasys. Questa tecnica prevede l'estrusione attraverso un ugello di un filo di materiale, di solito polimerico, ad una temperatura leggermente superiore a quella di fusione. Il materiale depositato raffredda e solidifica. Diversamente il robocasting prevede la deposizione attraverso un ugello di un materiale ceramico allo stato acquoso che asciuga nel giro di 10-15[s] solidificando. In questa tecnica è molto importante lo spessore di materiale depositato per evitare che questo risulti o troppo liquido, piccoli spessori, o simile ad una corda, grossi spessori. La Freeze-form Extrusion Fabrication, FEF, è molto simile alla tecniche robocasting ma usa basse temperature per solidificare il materiale sempre a base acquosa.

polvere: La produzione di parti a partire da polveri è basata sulla solidificazione selettiva del materiale grazie ad una fonte di calore. Selective Laser Sintering, SLS, usa un raggio laser per fondere la polvere in punti di interesse in modo da creare la sezione solida desiderata, successivamente viene aggiunto uno strato di polvere da

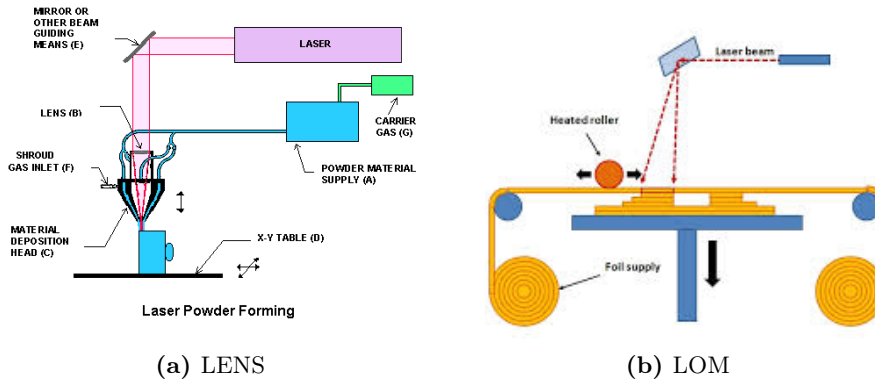


Figura 1.2: Tecniche AM 3

solidificare nuovamente. Questa tecnica può produrre parti in materiale polimerico, cera come anche metallico o ceramico grazie all'uso di polimeri come leganti; questo comporta successive lavorazioni termiche, sinterizzazione, per l'eliminazione del polimero. Selective Laser Melting, SLM, è molto simile alla tecnica SLS, la differenza risiede nella diversa potenza del laser usato, più alta nella SLM e questo porta ad un prodotto finale che non ha bisogno di post-processing e qualità meccaniche migliori ma in generale è più difficile controllare questa tecnica; si rischia di avere nel prodotto finale stress residui e deformazioni dovute agli alti stress termici causati. L'Electron Beam Melting (EBM) sostituisce l'utilizzo del laser con un fascio di elettroni, questo porta ad avere necessità di una camera a vuoto. Il prodotto finale ha mediamente qualità superiori rispetto ad uno stampato con tecniche SLM e richiede un tempo di realizzazione minore. Altra tecnica inerente l'uso di materiale in polvere è la tecnica LENS, laser engineered net shaping, anche nota come Laser Metal Deposition, LMD, o Direct Metal Deposition, DMD, o laser cladding. Questa tecnica prevede di fornire la polvere di materiale direttamente nella zona dove essere depositato grazie ad un estrusore posto coassialmente o meno con il laser che provvede a fondere il materiale. Infine abbiamo come tecniche per la produzione da polvere una tecnica denominata stampa tridimensionale, 3DP. Questo sistema solidifica selettivamente strati di polvere grazie ad una testa in grado di rilasciare un materiale atto a funzionare da binder e che unisce le particelle di materiale solidificando le zone selezionate. Quasi sempre sono necessari trattamenti di post-processing come sinterizzazione o infiltrazioni.

solido: I materiali allo stato solido sono forniti sotto forma di fogli laminati, Laminated Object Manufacturing (LOM). Questi vengono tagliati lungo un contorno predeterminato in modo da ottenere la sezione desiderata; in seguito vengono fatti aderire al foglio precedente grazie ad una pressatura a caldo fatta con dei rulli. Il vantaggio di questa tecnica risiede nell'alta velocità di stampa dovuta al fatto che bisogna tagliare solo il contorno di ogni sezione senza doverla costruire in toto; lo svantaggio risiede nella qualità del prodotto finale che non è elevatissima.

Separatamente da tutte le altre tecniche viene citata una tecnica uscita recentemente che sembra poter portare dei grandi vantaggi nei tempi produttivi dell'AM [5]. Questa tecnica mostrata in figura 1.4 è denominata CLIP, continuous liquid interface production.

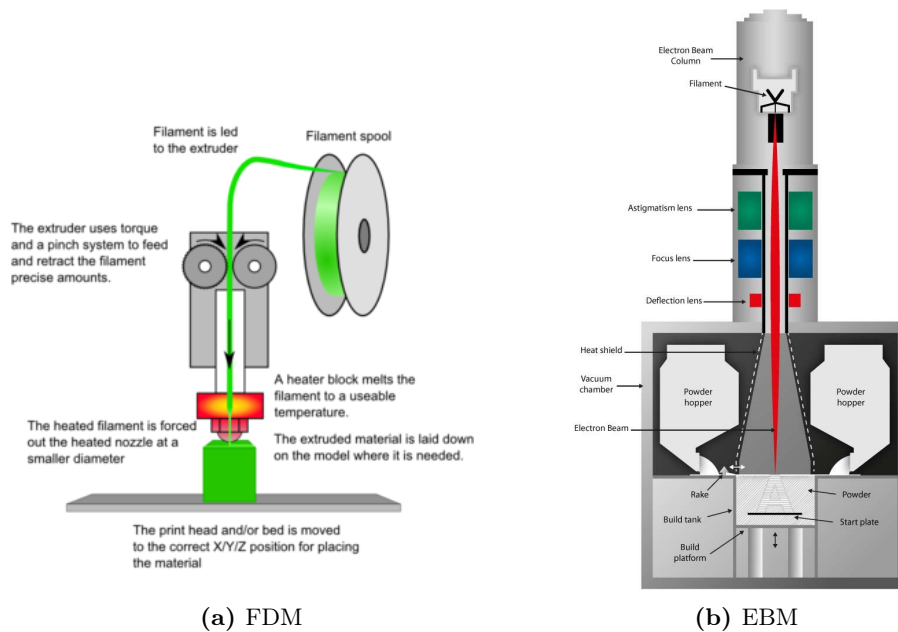


Figura 1.3: Tecniche AM 2

Si basa sullo stesso principio della SLA ma la solidificazione del materiale non avviene dall'alto ma dal basso come si vede in figura 1.4a. Una piattaforma viene immersa nella resina da solidificare e viene tirata su portando con sé il polimero indurito. La produzione continua di un polimero monolitico avviene grazie a una luce UV controllabile che attraversa un materiale permeabile all'ossigeno. Questo materiale, Teflon AF 2400, è fondamentale per la creazione di una zona morta di pochi decine di micron tra il materiale stesso e la zona dove inizia a solidificare il polimero. La zona morta impedisce la solidificazione del polimero grazie alla presenza dell'ossigeno e permette di controllare la solidificazione della resina. Il vantaggio di questa tecnica risiede nei tempi di produzione. La stampante Carbon 3D mostrata all'opera in figura 1.4b ha tempi di stampa dichiarati di pochi minuti in confronto delle ore di tecniche FDM o della classica SLA. Se questa tecnica avrà successo potrebbe permettere di competere con i tempi di produzione delle tecniche tradizionali.

Date le tecniche sopra descritte si sta sviluppando negli ultimi tempi la possibilità di soluzioni ibride nell'AM. Queste soluzioni prevedono l'utilizzo di una tecnica AM combinata con una tecnica di lavorazione classica, tipicamente macchine CNC [6], [7]. Questa unione delle due tecniche permette di sfruttare sia i vantaggi delle lavorazioni classiche che di quelle additive. Solitamente con tecniche AM non si riescono a raggiungere grandi finiture superficiali e grandi tolleranze dimensionali a meno di allungare di molto i tempi produttivi, ed anche in questo caso il risultato non è garantito. L'uso di macchine CNC successivamente alla stampa del pezzo o meglio ancora l'utilizzo di macchine che integrano al loro interno le due tecniche può portare al superamento di questi limiti. Un esempio è dato in figura 1.5a dove è rappresentata una macchina che integra la tecnica FDM con una fresatrice; l'estrusore e la fresa sono intercambiabili grazie ad un meccanismo che permette una rotazione di 180°. Nella figura affiancata è invece possibile vedere un braccio meccanico che sorregge un piatto dove viene depositato il materiale stampato. Lo stesso braccio può essere usato per sottoporre il materiale a

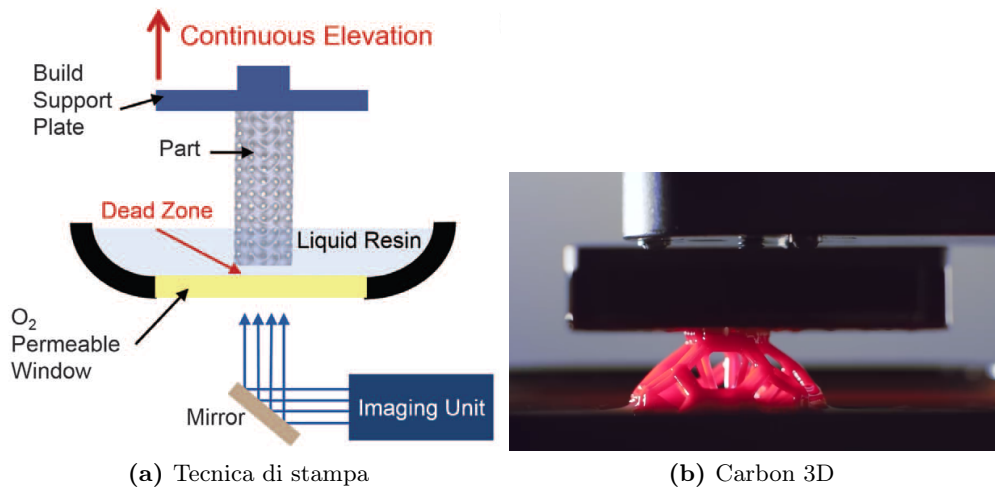


Figura 1.4: Tecnica CLIP

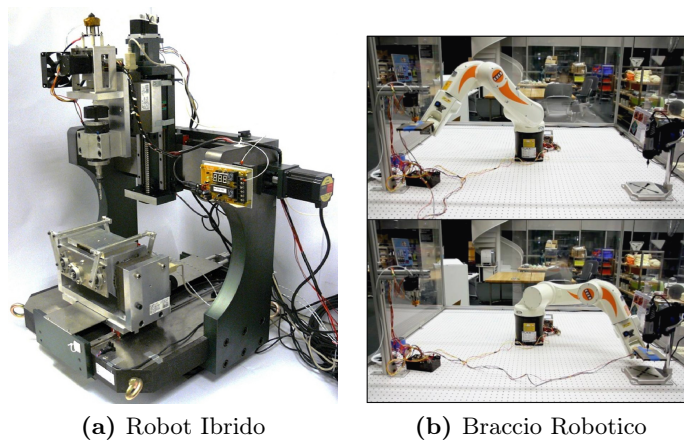


Figura 1.5: Soluzioni ibride

successive lavorazioni meccaniche una volta finito il processo AM o addirittura durante intervallando le due operazioni.

1.2.2 Materiali per AM

L'AM nasce per la produzione di oggetti a base polimerica ma nel giro di poco tempo si è arrivati a produrre diversi tipi di materiali che possono essere così raggruppati:

polimeri: I materiali polimerici sono composti da molecole che ripetono una stessa unità strutturale; esistono una vasta gamma di polimeri tra naturali e sintetici. Nei processi AM abbiamo fondamentalmente resine fotoindurenti, nylon, elastomeri, ABS e cera. Il nylon è un poliammide molto usato è studiato nelle tecnica SLS perchè fonde e si lega attraverso l'uso del laser meglio di ogni altro polimero. La plastica ABS è un materiale molto popolare nella tecnica FDM. I polimeri fotoindurenti sono invece utilizzati nella tecnica SLA; questi tendono ad indurire se sottoposti ad un trattamento laser di lunghezza d'onda specifica.

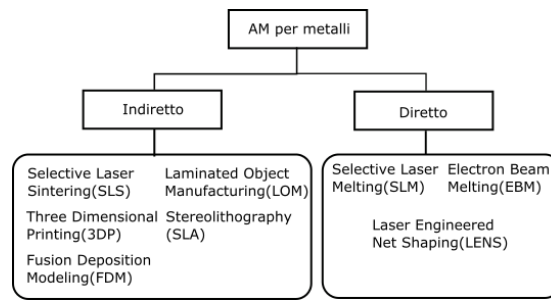


Figura 1.6: Tecniche AM per metalli

Tabella 1.1: Proprietà meccaniche di prodotti stampati con tecniche AM

Materiale	Tecnica	σ_r [MPa]	σ_y [MPa]	Modulo Young[GPa]
T6A14V	EBM	1020	950	120
	LENS	1077	973	-
316SS	LENS	655	278	-
17-4SS	SLM	1050±50	540±50	170±20

metalli: Parti metalliche possono essere prodotte attraverso due modalità, metodo diretto od indiretto. Nel primo si usa un legante, binder, per legare le particelle metalliche in modo da formare l'oggetto tridimensionale; è richiesta poi un'attività di postprocessing per ottenere le proprietà desiderate sul prodotto finale. Il metodo diretto può prevedere la fusione parziale delle particelle metalliche o del binder, solitamente un polimero; i trattamenti successivi sono solitamente di tipo termico tesi a rimuovere il binder stesso ed ad ottenere una struttura finale la più compatta possibile. Si può anche evitare la fusione di una delle due parti come nella tecnica SLS dove il binder è unito alla polvere metallica, precedentemente depositata, nei punti dove si vuol far indurire il materiale, oppure come nella SLA dove si possono mettere particelle metalliche in sospensione nella resina fotoindurente. I metodi diretti prevedono la totale fusione delle particelle metalliche per ottenere l'oggetto finale. Le tecniche usate si basano sul laser e sull'EBM. La totale fusione del materiale permette di ottenere pezzi finiti con proprietà meccaniche elevate. In tabella 1.1 si possono vedere alcuni dati riferiti ai materiali metallici più utilizzati e alle proprietà finali ottenute con specifiche tecniche AM. Parti metalliche possono essere ottenute anche combinando tecniche AM con tecniche di colata, Rapid Tooling. Si produce lo stampo attraverso un processo AM, per esempio con materiali ceramici, e poi si può utilizzare tale stampo per un processo di fonderia.

ceramici: Materiali ceramici vengono anch'essi prodotti con metodi diretti ed indiretti. L'AM si è dimostrata molto utile in questo settore in quanto la nota durezza e fragilità di questi materiali ha sempre reso difficile la loro produzione con tecnologie classiche. Nei metodi indiretti si produce di solito un green body, unione di particelle ceramiche ed un binder, che deve poi essere successivamente lavorato in maniera analoga ai metodi indiretti per i metalli. L'uso di metodi diretti, che prevedono la totale fusione del materiale, è più complesso da applicare sui materiali ceramici viste le loro alte temperature di fusione; in ogni caso sono state

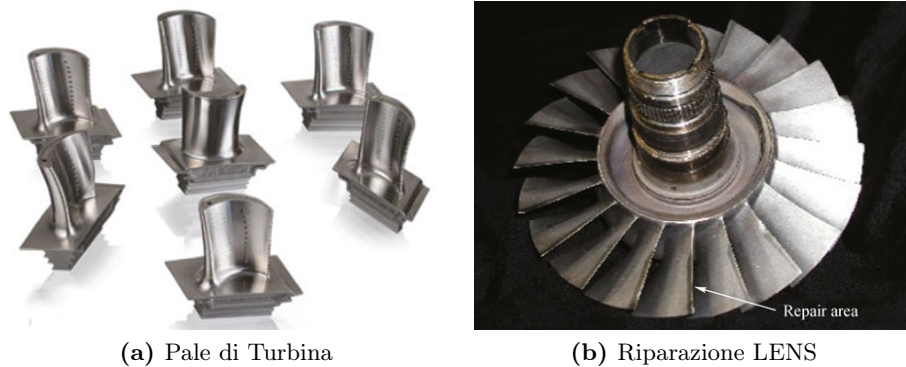


Figura 1.7: Applicazioni in campo aerospaziale

sperimentate tecniche SLM in questa direzione.

compositi: Infine sono da citare anche i materiali compositi che comprendono due o più materiali al loro interno che rimangono distinti all'interno del composito stesso. Il composito acquisisce proprietà differenti rispetto ai materiali che lo compongono. I compositi a seconda di come si uniscono i materiali al suo interno possono essere omogenei od eterogenei, con l'AM è possibile produrre entrambi i tipi. Per la produzione di composti omogenei si ha bisogno di preparare precedentemente il composito per poi essere usato dalla stampante; le tecniche FDM o LOM risultano le più adatte a questo scopo rispetto a quelle basate su liquido o polveri. La produzione di compositi eterogenei può avvenire attraverso la deposizione di materiali diversi in momenti successivi della stampa dell'oggetto o simultaneamente. Il poter utilizzare materiali diversi porta alla possibilità di formare i così detti Functionally Graded Materials, FGM. Questa possibilità può portare ad avere oggetti finali la cui composizione varia in maniera graduale e di conseguenza le proprietà meccaniche potendo ottenere per esempio in alcune parti elevata durezza ed in altre elevata tenacità.

1.2.3 Applicazioni

Il vantaggio di produrre pezzi dalla forma complessa e l'alto grado di personalizzazione del prodotto finale con diversi tipi di materiali ha portato le tecniche AM ad avere un impiego sempre più diffuso negli ultimi anni nel mondo industriale. Di seguito viene descritto qualche esempio in modo da poter comprendere le possibili soluzioni date da queste nuove tecnologie ed i loro possibili sviluppi. Il campo aerospaziale è l'ideale per l'uso di queste tecnologie; si ha qui necessità di pezzi complessi in produzione limitata inoltre spesso è necessario l'uso di materiali ceramici per applicazioni ad alte temperature e come già detto questi sono difficili da lavorare con le tecniche produttive classiche. Alcune applicazioni specifiche sono la produzione di pale di turbina come quelle mostrate in figura 1.7a prodotte con tecnica SLM in lega Inconel 718. Altra applicazione di grande interesse è la riparazione di componenti grazie a tecniche LENS che si sono dimostrate molto utili nel prolungare la vita di componenti quali compressori, turbine e parti di sostegno portando ad un notevole risparmio di costi. In figura 1.7b si vede una riparazione effettuata con tecnica LENS.

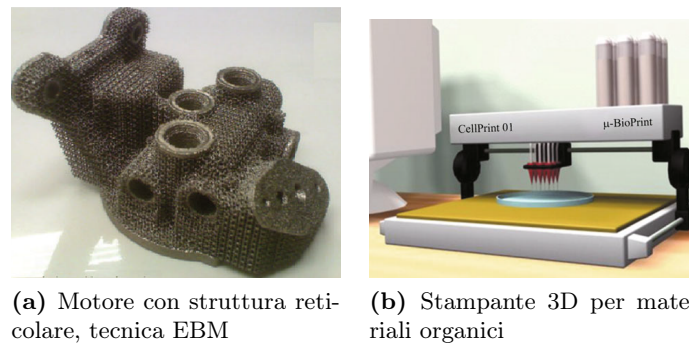


Figura 1.8: Applicazioni in campo automotive e biomedico

Nel mondo dell'automotive l'AM ha trovato grande applicazione nel campo della progettazione e sviluppo di componenti riducendo notevolmente i tempi di ingegnerizzazione e messa in produzione. Si è trovata anche qualche applicazione per la produzione di parti funzionali quali gas di scarico, parti del cambio o del sistema di frenata per auto di lusso o veicoli sportivi; diversi esempi di quest'ultima applicazione sono dati dall'azienda italiana CRP technology che ha prodotto diversi componenti per Formula 1 e Moto GP usando tecniche AM. In figura 1.8a si vede una parte di un motore prodotta con struttura reticolare in modo da ridurre il peso senza perdere in caratteristiche meccaniche; è stata utilizzata una tecnica EBM.

Altro campo vastissimo è quello biomedico dove l'AM ha trovato applicazione nella odontoiatria, per tissue scaffolds che letteralmente sono impalcature tissutali cioè strutture di sostegno per i tessuti, organi artificiali, strumenti medici, reti micro-vascolari e chip biologici ottenuti posizionando cellule e proteine. Il vantaggio dell'AM in questo campo risiede nella personalizzazione del prodotto finale; tutto ciò che deve essere impiantato su un corpo umano deve essere fatto su misura della persona stessa e questo non permette produzioni industriali data anche la forte complessità delle forme geometriche del corpo umano. In figura 1.8b si è voluto mostrare una delle applicazioni più interessanti; qui si può vedere una stampante 3D in grado di stampare materiale organico attraverso delle siringhe partendo sempre da un file CAD. Questo tipo di stampa è sicuramente diversa da quelle precedentemente descritte e presenta problematiche differenti data la natura del materiale usato.

Nel campo delle energie rinnovabili l'AM può contribuire sempre diminuendo i tempi di progettazione ed ingegnerizzazione, inoltre sono possibili lo sviluppo di componenti con nuove strutture in grado di garantire una maggiore efficienza e densità energetica. Esempi applicativi sono l'utilizzo di tecniche SLS per la produzione di piatti in grafite, componenti fondamentali delle fuel cells.

1.3 Struttura e cinematica delle stampanti 3D

Per poter al meglio comprendere i vantaggi della soluzione cinematica e costruttiva che viene proposta in questa tesi oltre ad avere una visione completa di come l'AM funziona è importante andare a studiare come sono strutturate le stampanti 3D ad oggi in commercio, andando a studiare la loro struttura cinematica, a vedere quali e quanti sono i gradi di libertà del sistema e come sono in grado di attuare tali gdl. Questo studio è stato affrontato principalmente ricavando informazioni direttamente dai siti

delle aziende produttrici e da brevetti di tali aziende. In tabella 1.2 sono elencate le maggiori aziende produttrici ad oggi nel campo della stampa 3D e le tecniche AM usate.

Tabella 1.2: Aziende e tecnologie per stampa 3D

Compagnia(anno di fondazione)	Tecnologia Stampa 3D
3D Systems(1986),USA	SLA,SLS,MJP
Statasys(1992),USA	FDM,Polyjet,WDNM
ExOne(2005),USA	Binder Jetting
Arcam(1997),Svezia	EBM
Optomec(1998),USA	AereosolJet,LENS
EOS(1989),Germania	SLA,SLM

Verranno studiate le prime 5 aziende elencate in tabella, questo perchè la EOS usando tecnologie comprese tra quelle delle altre aziende descritte non aggiunge niente di nuovo alla descrizione della cinematica delle stampanti ed un suo studio risulterebbe ridondante rispetto alle descrizioni delle aziende che la precedono. Le stampanti 3D possono ritenersi principalmente composte da:

- testa di stampa
- piattaforma mobile

La testa di stampa è l'organo che deposita il materiale che viene stampato. Questo concetto così espresso è abbastanza generico; solamente osservando le figure precedenti sulle tecniche AM si avrà difficoltà a trovare una *testa* nelle tecniche laser o EBM. Si può comunque lasciare questa definizione sottintendendo con questo termine uno o più organi preendenti parte alla stampa ma separati dalla piattaforma mobile e che servono per depositare il materiale o per solidificarlo, od entrambi. La piattaforma mobile non è altro che il piatto dove viene depositato il materiale; non è tecnicamente necessario o comunque obbligatorio che questa si muova ma in linea generale quest'organo è dotato di almeno un grado di mobilità. Da un punto di vista della cinematica, con le dovute eccezioni di cui viene dato qualche esempio, le stampanti 3D sono così strutturate:

- 3 gdl complessivi
- 1 gdl alla piattaforma mobile
- 2 gdl alla testa di stampa
- uso di sistemi seriali

Non si hanno quasi mai più di 3gdl nelle stampanti 3D. Generalmente la piattaforma mobile è in grado di spostarsi verticalmente permettendo la stampa di uno strato dopo l'altro e lo sviluppo tridimensionale dell'oggetto che viene prodotto. La testa che ha il compito di volta in volta di creare dei sottili strati è in grado di fare degli spostamenti nel piano in modo tale da poter ricreare le sezioni pressochè bidimensionali derivate dal CAD dell'oggetto in stampa. Il tutto si basa su sistemi seriali guidati da motori elettrici; anche in questo caso ci sono le dovute eccezioni.

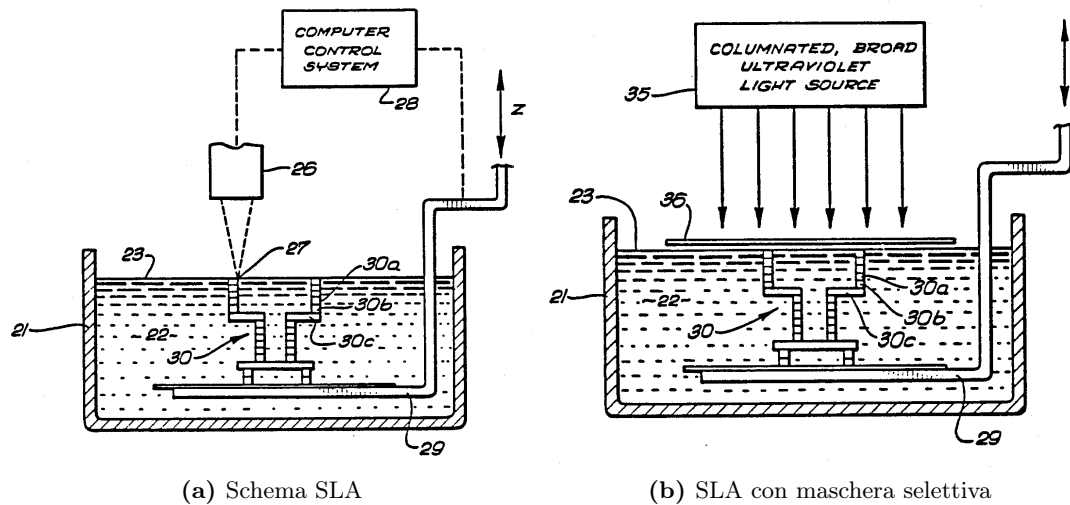


Figura 1.9: Tecnica SLA della 3D Systems

1.3.1 3D Systems

La 3D Systems, azienda americana per prima entrata sul mercato mondiale con stampanti 3D basa i suoi prodotti su tecniche SLS e SLA, quindi sull'uso del laser. Tutte e due le tecniche necessitano di una piattaforma in grado di muoversi verticalmente; nel primo caso bisogna dare spazio all'aggiunta di un nuovo strato di polvere una volta solidificato il precedente, mentre nel secondo l'abbassamento della piattaforma permette all'ultimo strato indurito di essere coperto da una sottile quantità di nuovo liquido. Non si possono dare ulteriori gradi di libertà alla piattaforma sia traslazionali che rotazionali in quanto sarebbe inutile e/o dannoso. Si immagini di ruotare una piattaforma con del liquido o della polvere sopra; il liquido rimarrebbe orizzontale rendendo vana la rotazione e dannosa in quanto lo strato precedentemente indurito non sarebbe più parallelo al liquido rendendo difficile e disomogenea la solidificazione di un nuovo strato; la polvere tenderebbe a crollare su se stessa. Lo spostamento nel piano è inutile in quanto garantito dalla testa; il laser con un sistema di specchi mobili, che sono i veri gdl del sistema, può essere facilmente direzionato nel piano in modo da solidificare le zone desiderate.

In figura 1.9a è possibile vedere lo schema delle macchine SLA della 3D Systems come mostrato in un brevetto del 1984 [8]; è da qui chiaro come il laser vada via via solidificando selettivamente il liquido mentre la piattaforma scende. Nella figura 1.9b è indicata con il numero 36 una maschera che ha il compito di selezionare le zone da indurire; al posto del laser si usa una fonte di luce UV uniforme su tutto il liquido ma la maschera permette il passaggio e quindi la solidificazione solo in alcuni punti. La maschera può essere fissa, permettendo la realizzazione di oggetti dalla sezione costante, o mobile nel senso che si può cambiare in maniera automatica la maschera sostituendola o incrociandola con altre in modo da ottenere sezioni diverse. In figura 1.10 è possibile vedere due modalità con cui è possibile direzionare il laser [9], [10]. In una si usano degli specchi galvanometrici, nella seconda sono ben visibili dei motori elettrici, indicati con i numeri 148 e 149, collegati direttamente agli specchi; gli specchi conferiscono al sistema i 2 gdl nel piano per la formazione della sezione. In figura 1.11a è invece visibile

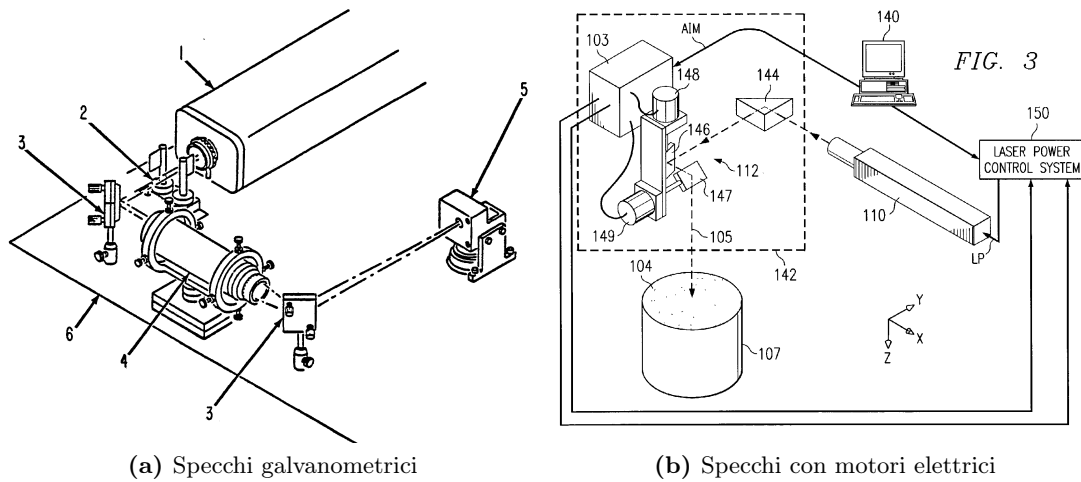


Figura 1.10: Specchi mobili

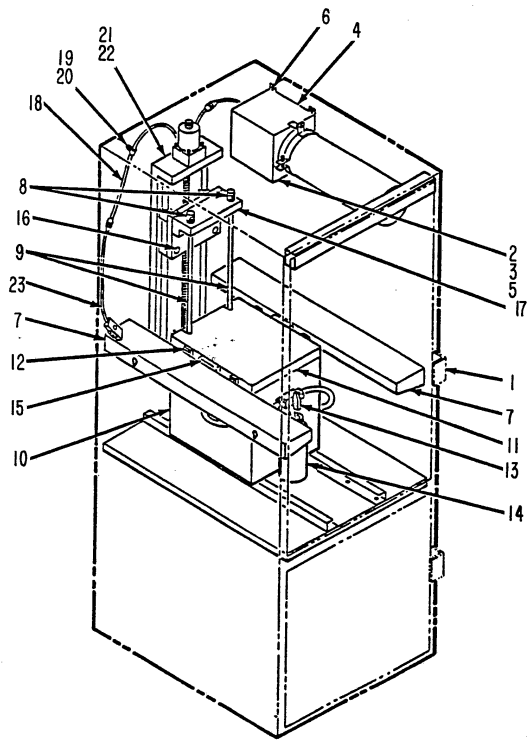
un disegno di un'intera stampante SLA. Si vede come la piattaforma mobile acquisisce il suo grado di libertà grazie ad un motore elettrico, posizionato in cima al sistema ed indicato con il numero 22, collegato ad una vite senza fine che se messa in rotazione può sollevare ed abbassare la piattaforma. Affianco è visibile un modello della 3D Systems.

Il sistema di movimentazione delle stampanti SLS è molto simile a quello delle stampanti SLA essendo tutte e due le tecniche basate sull'utilizzo del laser. L'utilizzo di polvere nella tecnica SLS porta con sé la necessità di dover compattare la polvere ogni volta che se ne aggiunge e la piattaforma si abbassa. Per questo in tali stampanti si trovano dei rulli o simili che compiono tale operazione; il rilascio della polvere avviene di solito grazie ad un sistema di pistoni di alimentazione controllati da motori [9].

Infine l'ultima tecnica adottata dalle stampanti 3D Systems è quella del MultiJet Printing, MJP, che non è altro che la tecnica MJM come precedentemente descritta nella sezione sulle tecniche AM. In questo caso la struttura della stampante è molto simile a quella di una stampante classica. Vi è una testa in grado di spostarsi nel piano e al contempo di rilasciare materiale ed indurirlo grazie ad una luce UV posta sulla testa stessa. La piattaforma si muove sempre verticalmente scendendo verso il basso [11]. In figura 1.12 è mostrato un disegno base di questa tipologia di macchine. La testa(20) in questo caso è in grado di muoversi solo orizzontalmente grazie a delle guide ed è trainata da una cinghia mossa da un motore elettrico. La piattaforma è in grado di scendere e di salire per mezzo di un sistema di attuazione(16) idraulico o pneumatico od elettrico [11]. Da sottolineare come tutte queste stampanti lavorano in ambienti chiusi dove è possibile controllare la temperatura. All'interno delle stampanti della 3D Systems sono disponibili anche stampanti con tecniche denominate Direct Metal Printing che non è altro che la già citata SLM, quindi una tecnica sempre basata sul laser e materiale sotto forma di polvere.

1.3.2 Stratasys

Stratasys è un'altra azienda americana leader nella stampa FDM che è stata brevettata dal fondatore della società Scott Crump nel 1989 [12]. Questa tecnica prevede la



(a) Stampante SLA



(b) Projet6000SD

Figura 1.11: Stampanti della 3D Systems

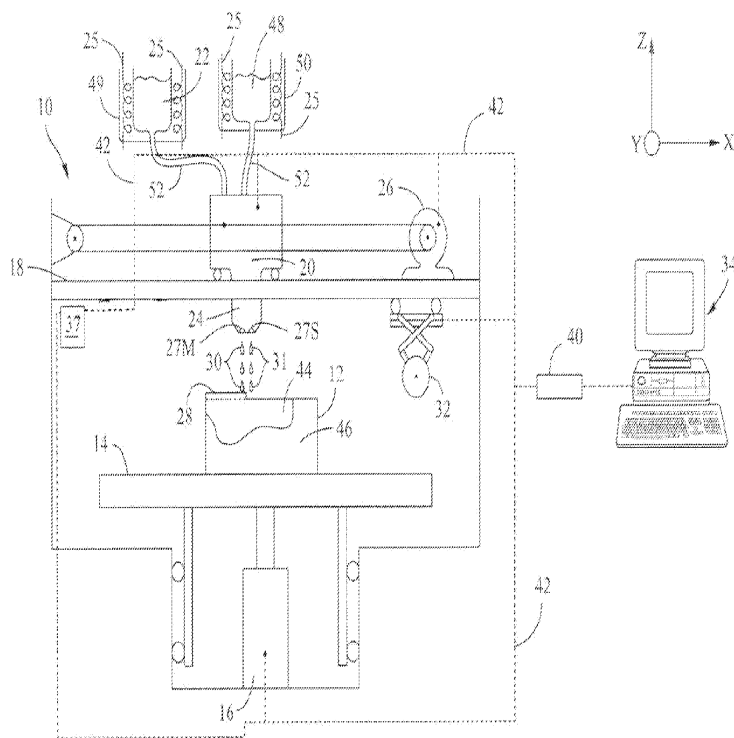


Figura 1.12: Tecnica MJM della 3D Systems

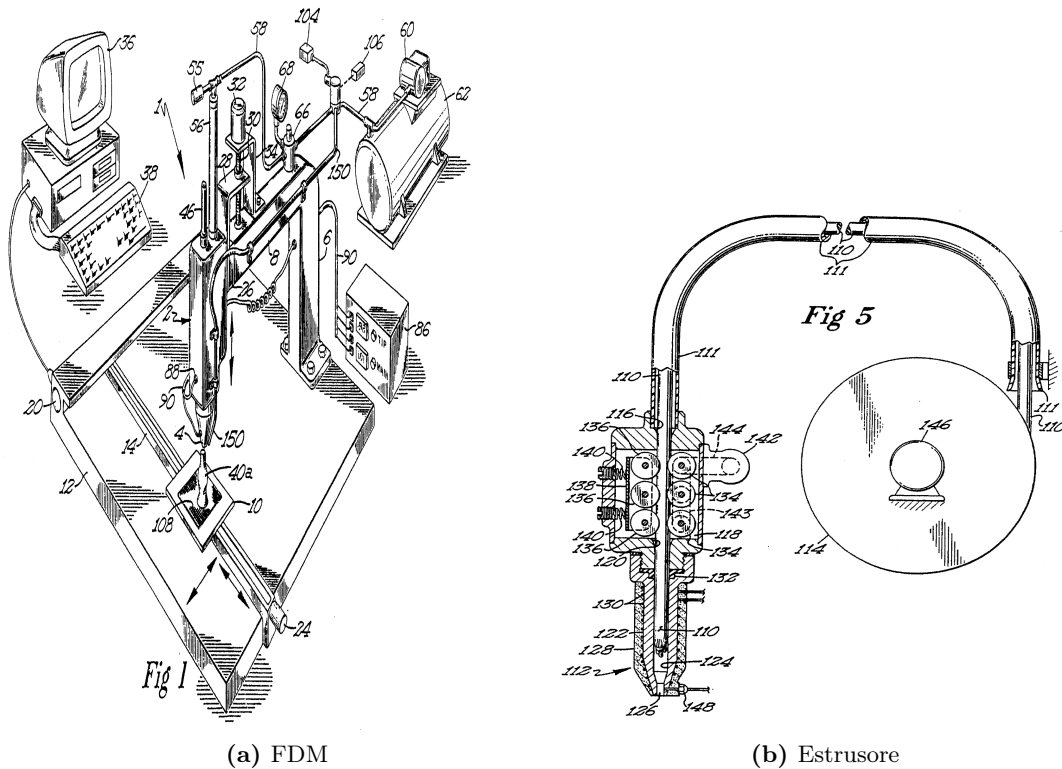


Figura 1.13: Tecnica FDM della Stratasys

movimentazione dell'estrusore nel piano e il conseguente abbassamento della piattaforma. In figura 1.13a è presente uno schema tratto dal primo brevetto relativo a tale tecnica [13], inoltre è presente anche un'immagine relativa all'estrusore, i cui movimenti sono coordinati con il resto del sistema, ed ad una cartuccia dove è raccolto il materiale sotto forma di filo. Nella figura come mostrata è indicato che l'estrusore può muoversi solo verticalmente mentre la piattaforma può muoversi nel piano. Essendo disegni tratti da un brevetto sono puramente indicativi, infatti nella realtà molto spesso è la testa a muoversi mentre il piano si muove verticalmente. Questa scelta è concorde con il fatto che muovere una testa di estrusione di dimensioni relativamente piccole piuttosto che l'intera piattaforma permette di avere macchine più compatte. Il materiale viene depositato ad una temperatura poco sopra quella di fusione; di solito è l'estrusore che svolge questo compito scaldando il filo mentre passa tra i rulli dell'estrusore stesso che lo trascinano. Le stampanti FDM, come in realtà molte altre, sono basate una struttura di sostegno denominata gantry systems; consiste in una struttura seriale a cavalletto simile ad un carroponete, due sostegni laterali su cui può scorrere una barra sulla quale può a sua volta scorrere la testa di estrusione. Al di sotto della testa la piattaforma è in grado di muoversi verticalmente. Due esempi sono dati in figura 1.14, [14] [15]. Nella figura 1.14a sono ben visibili tre motori elettrici in grado di muovere le parti della stampante. I due motori in alto contrassegnati dai numeri 36 e 34 muovono la testa di estrusione mentre quello in basso è in grado di mettere in rotazione le 4 viti senza fine su cui è ancorata la piattaforma in modo da far salire e scendere quest'ultima. Il brevetto da cui è stata tratta l'immagine è molto interessante in quanto è legato alla possibilità di produrre con tecnica FDM materiali metallici. La struttura è completamente chiusa

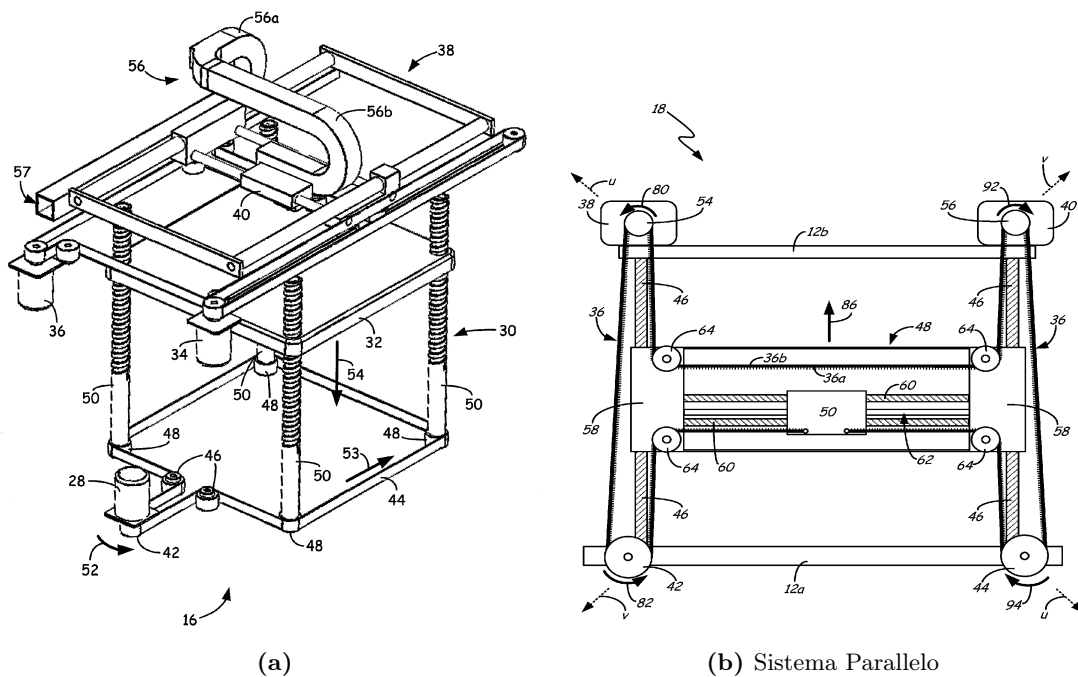


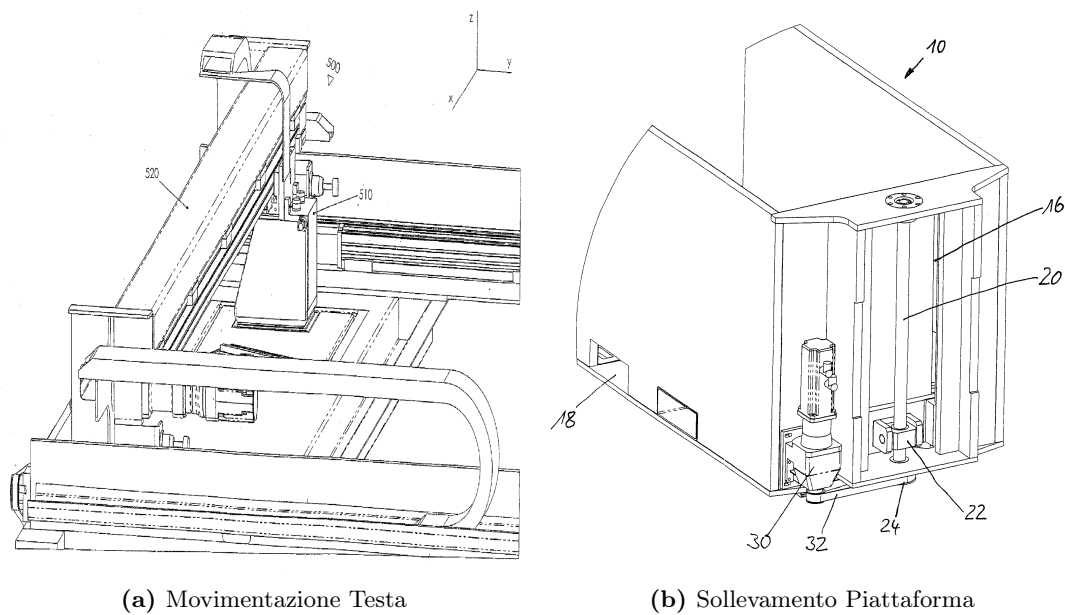
Figura 1.14: Gantry System

in una camera riscaldata fino a 200°C , tranne i motori elettrici che rimangono posti al di fuori. Ad oggi non sembrano essere disponibili macchine di questo tipo ma è evidente che la Stratasys sta lavorando in tale direzione. Nella figura 1.14b è osservabile dall'alto un sistema di movimentazione della testa di estrusione. Ciò che è interessante notare è il fatto che la cinematica di questo sistema è parallela e non seriale come ci si potrebbe aspettare, si pensi sempre al già citato gantry system. In questo caso i movimenti dei due motori connessi alle pulegge in alto deve essere coordinato in modo da ottenere il moto desiderato. In figura si vede come una rotazione di ugual velocità ma senso opposto dei due motori provoca uno spostamento verticale, riferito all'immagine, della testa.

La tecnica polyjet della Stratasys è simile alla MJM della 3D Systems. Qui vengono depositate sulla piattaforma minuscole gocce di fotopolimeri indurite tramite l'uso di luce UV. Non si ha nessuna variazione particolare rispetto alla cinematica precedentemente descritta [16]. La tecnologia WDNM ha la sua caratteristica principale nell'usare cera, wax, come materiale di stampa; tecnica molto usata nel campo odontoiatrico.

1.3.3 ExOne

L'ExOne è l'azienda leader nell'utilizzo della tecnologia binder jetting, cioè solidificazione selettiva di strati di polvere attraverso l'uso di un binder generalmente polimerico; si tratta della tecnologia descritta precedentemente con il nome 3DP. In figura 1.15 sono rappresentati i sistemi di movimentazione di una stampante ExOne [17]. Nella figura 1.15a è visibile la testa di estrusione del binder (510) che può scorrere su una guida lineare (520) grazie al motore elettrico visibile nella parte bassa dell'immagine. La guida può a sua volta scorrere lungo altre due guide di appoggio sempre per mezzo di un motore elettrico. Nella figura affianco si vede un possibile sistema di movimentazione



(a) Movimentazione Testa

(b) Sollevamento Piattaforma

Figura 1.15: Stampanti ExOne

della piattaforma basato sempre sulla coppia motore elettrico-vite senza fine [18]. In questo tipo di stampanti è previsto anche un sistema per il rilascio della polvere.

1.3.4 Arcam

Arcam, azienda svedese, è l'unica a fornire stampanti 3D basate sulla tecnica EBM. Questa tecnica come nel caso del laser porta la stampante ad non avere una vera e propria testa di estrusione, il raggio di elettroni viene opportunamente deviato in modo da solidificare solo le zone di interesse. In figura 1.16a si vede la struttura base di queste stampanti [19]. Abbiamo in testa alla stampante il generatore del fascio di elettroni(306), sistema anodo-catodo, da qui il fascio passa attraverso un sistema in grado di collimare e deviare il fascio grazie a degli specifici avvolgimenti; infine il fascio arriva a colpire la strato di materiale in polvere, il tutto in una camera a vuoto dove si ha una pressione di 10^{-4} [mbar]. Ai lati della stampante si trovano i contenitori del materiale. In figura 1.16b si vede la stampante Arcam Q20, la struttura della stampante è la stessa rappresentata nel disegno adiacente.

1.3.5 Optomec

L'optomec, azienda americana, basa le sue stampanti su due tecnologie, l'aereosoljet e LENS. La prima tecnica è stata brevettata dalla società ed è impiegata esclusivamente per la stampa di circuiti elettronici. Si basa sulla atomizzazione di un materiale che viene poi spruzzato su un piano, grazie ad un ugello ed all'aiuto di un gas di collimazione, creando così un circuito elettrico. La figura 1.17 dà un'idea del processo. La tecnologia LENS prevede l'utilizzo di un laser per creare una zona fusa sulla quale aggiungere materiale in forma di polvere spruzzandolo direttamente sulla zona di interesse [20]. Questa tecnica può essere usata sia per creare oggetti tridimensionali su un piano sia

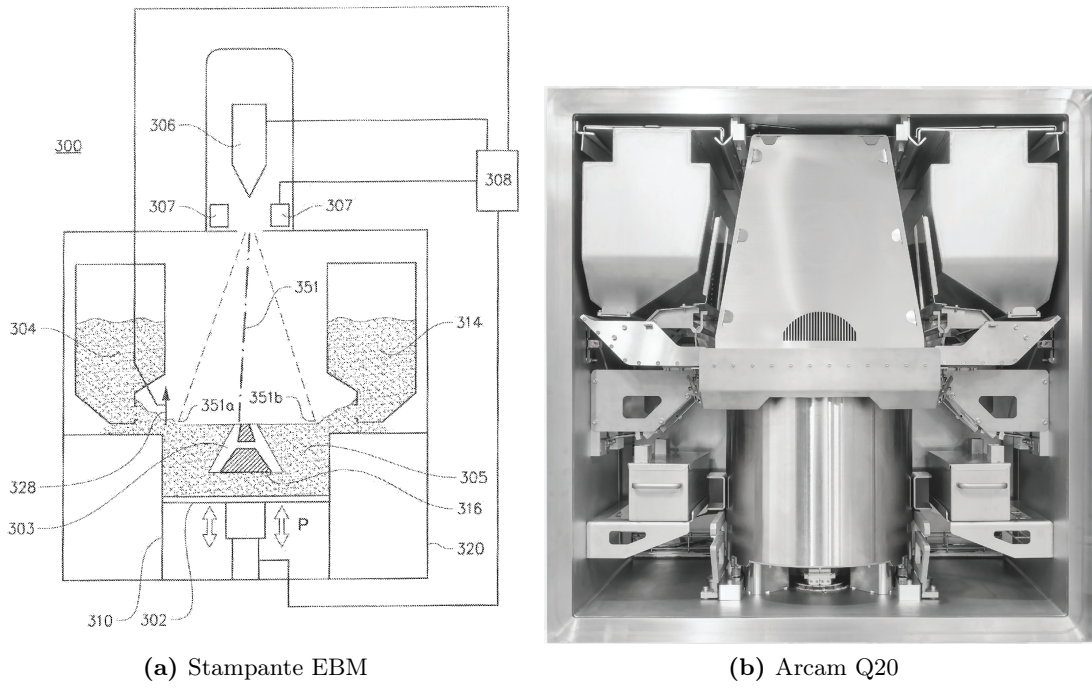


Figura 1.16: Tecnica EBM dell'Arcam

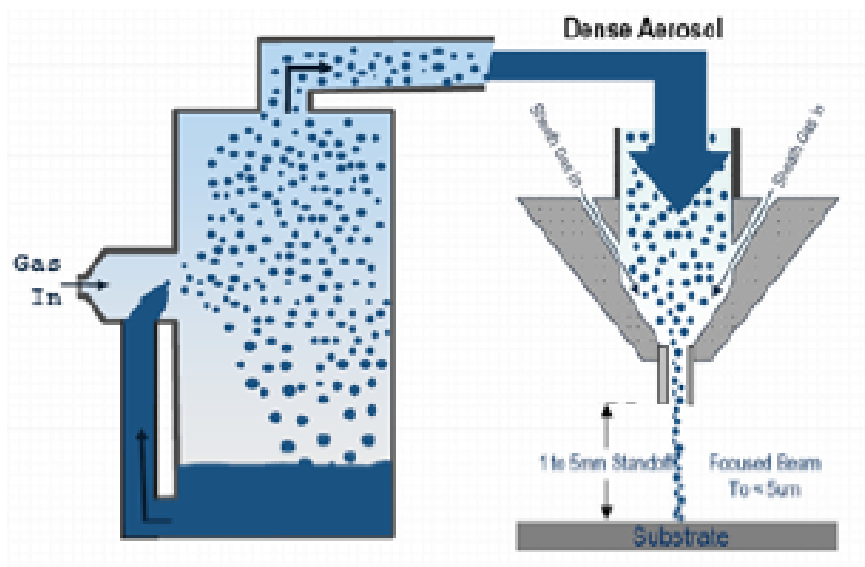


Figura 1.17: Tecnica AerosolJet

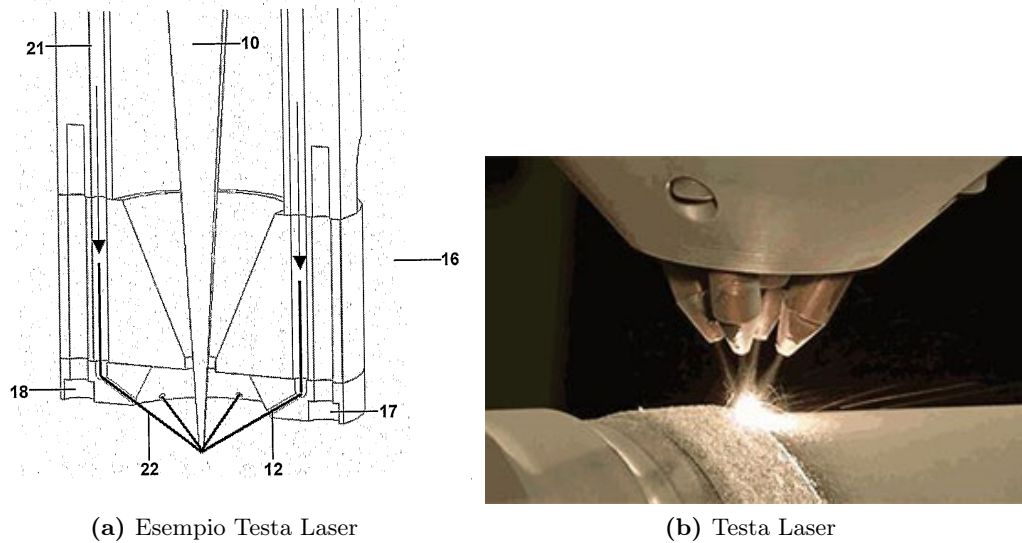


Figura 1.18: Tecnica LENS dell'Optomec

per riparare oggetti danneggiati e quindi depositando del materiale su una struttura già esistente. Nel primo caso di solito non è prevista una piattaforma mobile ma è la testa laser, da cui esce anche il materiale da depositare, a spostarsi. Una volta creato un layer, strato, non è necessario creare un moto relativo verticale tra piattaforma e testa, cioè allontanare la testa dalla piattaforma o la piattaforma dalla testa; questa tecnica può semplicemente focalizzare il laser ad un'altezza diversa aggiustando le lenti di focalizzazione e procedere alla formazione di un nuovo strato. Nel caso si abbia invece bisogno di riparare una parte le macchine Optomec consentono un moto relativo più ampio tra pezzo e testa. L'Optomec presenta a catalogo una stampante con 5 gdl. Nel caso specifico della stampante LENS 850-R la testa ha 3 gdl traslazionali mentre la piattaforma ne ha due di rotazione, rollio ed imbardata. In questo modo è possibile mettere in rotazione il pezzo rispetto al raggio laser nella stessa maniera in cui un pezzo in un tornio ruota relativamente all'inserto. Si può lavorare la superficie esterna del componente riparando dove è necessario. In figura 1.18 si vede la testa di queste macchine. Il fascio laser esce verticalmente dalla testa e da appositi ugelli laterali esce il materiale. Sono possibili diverse configurazioni. In figura 1.18b si vede una testa laser di una stampante Optomec mentre lavora un pezzo messo in rotazione sulla tavola. In figura 1.19 si può vedere la piattaforma mobile della LENS 850-R. Nella figura si vedono chiaramente i due motori elettrici connessi alla tavola che ne permettono le rotazioni in maniera seriale. La testa laser posta al di sopra della tavola è mossa grazie all'utilizzo di guide lineari.

1.3.6 Stampanti commerciali

Le descrizioni fino a qui effettuate riguardano stampanti di utilizzo industriale quindi il cui costo può essere anche molto alto; una stampante Stratasys FDM può costare tra i 100,000 e i 500,000\$ [21]. Esistono molte altre stampanti a basso costo per uso principalmente hobbistico, che come detto precedentemente occupa comunque una buona fetta del mercato totale di questo settore. Le aziende descritte offrono stampanti a basso costo ma esistono anche altre aziende o start-up che si sono lanciate sul merca-

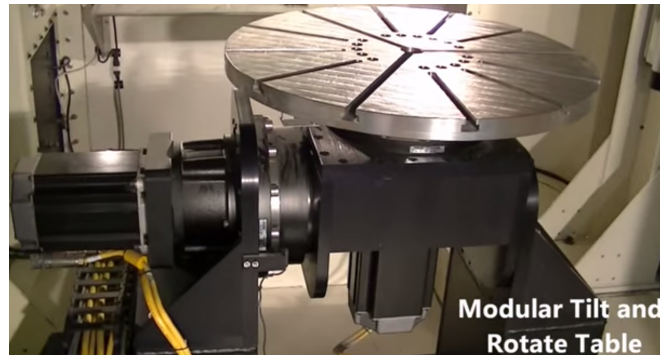


Figura 1.19: LENS 850-R

to delle stampanti a basso costo; si parla di stampanti dal valore tra i 1000 e i 5000 dollari. Queste stampanti sono principalmente basate su tecnica FDM il cui brevetto di proprietà della Stratasys è scaduto nel 2009. Questa tecnica è sicuramente meno costosa di quelle basate su laser o EBM ed è anche più facile da implementare, questo spiega la sempre maggiore comparsa di piccole stampanti in questo settore. L'interesse verso queste soluzioni non risiede nel basso prezzo di queste macchine, che comunque è legato ad una minore qualità del prodotto, ma sta nella cinematica di queste stampanti. Da quanto detto si è visto come le stampanti industriali sono principalmente di natura seriale ma è possibile a questo livello trovare stampanti a cinematica parallela basate sul robot *Linear Delta*. In figura 1.20 è rappresentata la stampante Delta Maker dal costo di circa 1500\$. La stampante ha una cinematica parallela in cui vengono dati 3 gdl traslazionali interamente alla testa di estrusione. Nelle figure 1.20a e 1.20b si può notare come sono realizzati i vincoli tra i links del robot e rispettivamente le guide lineari e la piattaforma.

1.4 Limiti dell'AM

L'Additive Manufacturing presenta dei grandi vantaggi e apre la possibilità a nuovi metodi produttivi. Queste tecniche presentano però alcuni limiti e problematiche associate. Le maggiori difficoltà sono:

- variabilità del risultato
- effetto staircase
- finitura superficiale
- materiale di supporto

Non tutte le problematiche elencate riguardano tutte le tecniche AM, o almeno interessano le diverse tecniche in maniera diversa data la differente natura con cui l'AM viene applicata. Da considerare anche che le 4 problematiche nonostante presentate separatamente sono collegate tra di loro, una ha effetti sulle altre. Una problematica che riguarda sicuramente tutte le tecniche AM è la variabilità del risultato. Data la natura di queste tecniche è i molti parametri da cui dipendono è difficile assicurare un risultato costante. In molti datasheet delle aziende precedentemente elencate di fianco

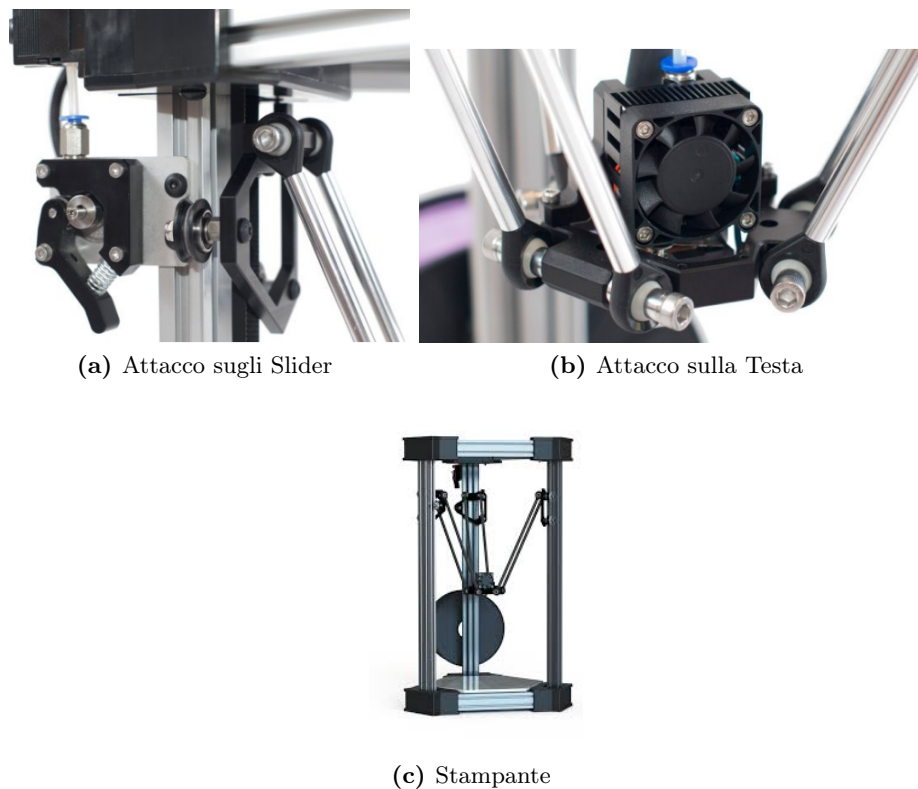


Figura 1.20: Delta Maker

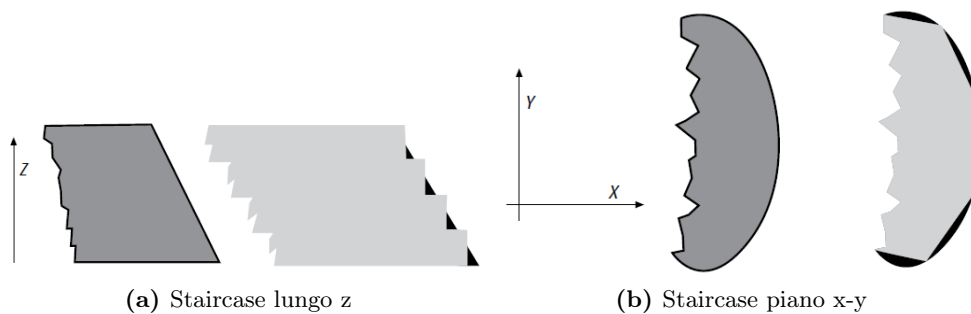
alle tolleranze dimensionali, se date, è specificato come queste dipendano da molti fattori ed il risultato è dipendente da ciò che si sta stampando. L'AM porta un'accuratezza geometrica che non è bassa in se [22], ma la sua dipendenza dalla forma e orientamento da ciò che si stampa la limita nella possibilità di produrre pezzi da mettere direttamente in servizio, pezzi per cui sono richieste specifiche tolleranze dimensionali. Nella tabella 1.3 sono stati elencati alcuni dati presi dai siti di queste aziende per dare un'idea degli ordini di grandezza di cui si sta parlando. Da notare come nella sezione tolleranze le indicazioni date sono vaghe e diverse. Per esempio 3D Systems e Stratasys per alcune stampanti danno un errore per unità di lunghezza, più il pezzo è grosso più l'errore è grande. In molti altri casi non sono presenti indicazioni riguardo la precisione della macchine; per quelle basate sul laser o EBM è indicativo il minimo diametro del fascio che rappresenta la minima area solidificabile.

L'effetto staircase deriva dal depositare uno strato sopra l'altro arrivando a creare una struttura a gradini [23] come dice la parola stessa. In figura 1.21 possiamo vedere gli effetti di questo problema sia nello sviluppo verticale dell'oggetto, lungo z , sia nel piano $x-y$. Risulta impossibile ricreare in maniera continua le superfici esterne dell'oggetto. Per ridurre questo problema la soluzione più ovvia è assottigliare lo spessore degli strati depositati; questo è però limitato da una parte da motivi tecnologici, non si può arrivare con facilità a creare strati di pochi micron, dall'altra da motivi economici. Ridurre lo spessore vuol dire aumentare i tempi di produzione del pezzo.

La finitura superficiale è ovviamente legata all'effetto staircase. Si è voluto separare le due problematiche in quanto per le tecniche di deposizione diretta del materiale, come FDM, si aggiunge un nuovo fattore a peggiorare la situazione, l'angolo di depo-

Tabella 1.3: Caratteristiche tecniche delle stampanti 3D

Azienda Stampante Tecnologia	3D Systems Project 6000HD SLA	3D Systems ProX 500 SLS	3D Systems ProX 300 DMP	Stratasys Object 500 Polyjet	Stratasys Fortus 450mc FDM
Volume di lavoro	250x250x250	381x330x457	250x250x300	406x355x406	490x390x200
Spessore Strato depositato	0.05	0.1	20 μ m	0.127	16 μ m
Tolleranze	0.025 – 0.05 per 25.4 del modello	-	ripetibilità $x=y=20\mu$ m	0.0015 mm/mm	Risoluzione $x=y=600$ dpi
Azienda Stampante Tecnologia	ExOne S-Max Binder Jetting	Arcam Q20 EBM	Optomec LENS 850-R LENS	EOS M400 SLS	EOS P 760 SLA
Volume di lavoro	1800x1000x700	350x380(\varnothing/H)	900x1500x900	400x400x400	700x380x580
Spessore Strato depositato	0.3	-	-	-	0.1
Tolleranze	Risoluzione lineare 0.1	Diametro fascio 180 μ m	Risoluzione lineare 0.25	Diametro fuoco 90 μ m	-

**Figura 1.21:** Effetto staircase

sizione [24], [25]. In figura 1.22 è indicato con α tale angolo. Questo angolo indica l'inclinazione relativa con cui si sta depositando uno strato sopra l'altro. Ciò che rende molto importante quest'angolo è l'attrazione gravitazionale; una volta depositato il filo di materiale prima di raffreddarsi e solidificarsi tende a deformarsi sotto l'azione del proprio peso. Se l'angolo α tende a zero questo effetto tende ad annullarsi mentre per angoli maggiori la situazione peggiora fino ad un massimo ai 90° . Da notare come in figura 1.22b è stata utilizzata una convenzione diversa per la misura di α , in questo caso α pari a 90° corrisponde al precedente angolo nullo. Per annullare questo effetto è importante depositare con un angolo di deposizione sempre prossimo a zero. Per fare questo è necessario concedere alla piattaforma la possibilità di ruotare; si noti come ruotare la testa della stampante non sarebbe equivalente in quanto il problema dipende dall'attrazione gravitazionale sempre perpendicolare al terreno, per annullare l'angolo α si ha bisogno che i due fili di materiale di strati adiacenti siano allineati con l'azione della gravità stessa.

Il materiale di supporto serve a sorreggere la struttura stampata durante il processo nel caso il pezzo non sia in grado di autosostenersi. Questo è un problema in termini di

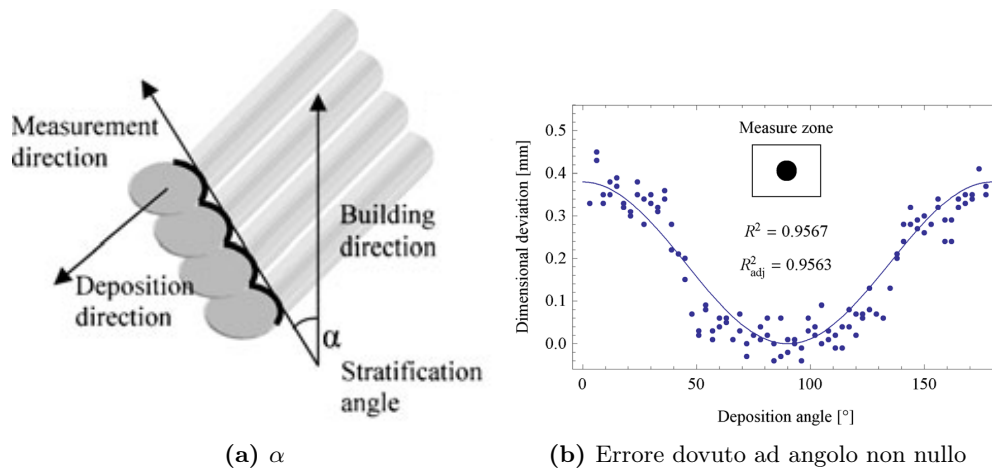


Figura 1.22: Angolo di deposizione

qualità del prodotto finale, solitamente il contatto con il materiale di supporto peggiora la qualità superficiale, ed in termini di costo soprattutto. Per tecniche SLA ed SLS il liquido e la polvere fungono da supporto stesso; finita una lavorazione si cerca di recuperare il materiale non usato per riutilizzarlo. Per le tecniche di deposizione diretta e invece richiesta la deposizione di altro materiale che può essere lo stesso usato per stampare o diverso. Per queste ultime l'utilizzo di una piattaforma con dei gradi di rotazione può risolvere il problema. Per che questo sia possibile è necessario che il materiale usato riesca ad unire in maniera efficace uno strato all'altro e aderisca alla piattaforma. In figura 1.23 si vedono due esempi dimostrativi di come la mobilità della piattaforma aiuti ad evitare il problema.

1.5 Progetto Efesto

Il progetto *Efesto* nasce nel dipartimento di meccanica del Politecnico di Milano con l'obiettivo di progettare e costruire una stampante 3D in grado di produrre pezzi a base metallica attraverso una tecnica di deposizione MIM (metal injection molding). Questa tecnica si basa sull'estrusione di polvere metallica unitamente ad un legante, binder, direttamente su una tavola mobile. Il materiale depositato attraverso un estrusore viene una volta finita la fase di deposizione sottoposto ad un processo termico di sinterizzazione per eliminare il binder e lasciare il solo materiale metallico.

La tecnica è innovativa e si preme di produrre pezzi metallici ad un costo minore rispetto alle tecniche precedentemente descritte che per la creazione di parti metalliche si basano principalmente sull'uso di laser o EBM il cui costo risulta essere ovviamente elevato. L'estrusore citato, figura 1.24b, è costituito da una tramoggia nel quale viene posto il composto che viene durante la lavorazione prima immesso in un plasticizzatore che attraverso una vite senza fine scalda ed introduce il materiale in una camera a valle dove un pistone estrude il materiale attraverso un ugello in modo da depositarlo sulla piattaforma mobile. L'estrusore ha un peso di circa 25Kg è risulta comprensibile come nasce spontanea l'idea di tenerlo fermo e muovere la piattaforma e non il contrario, cosa che renderebbe molto più difficile raggiungere elevati gradi di precisione nella movimentazione e nel posizionamento della struttura, inoltre questo comporterebbe lo sviluppo di un robot per la sua movimentazione molto più potente, e quindi costoso.

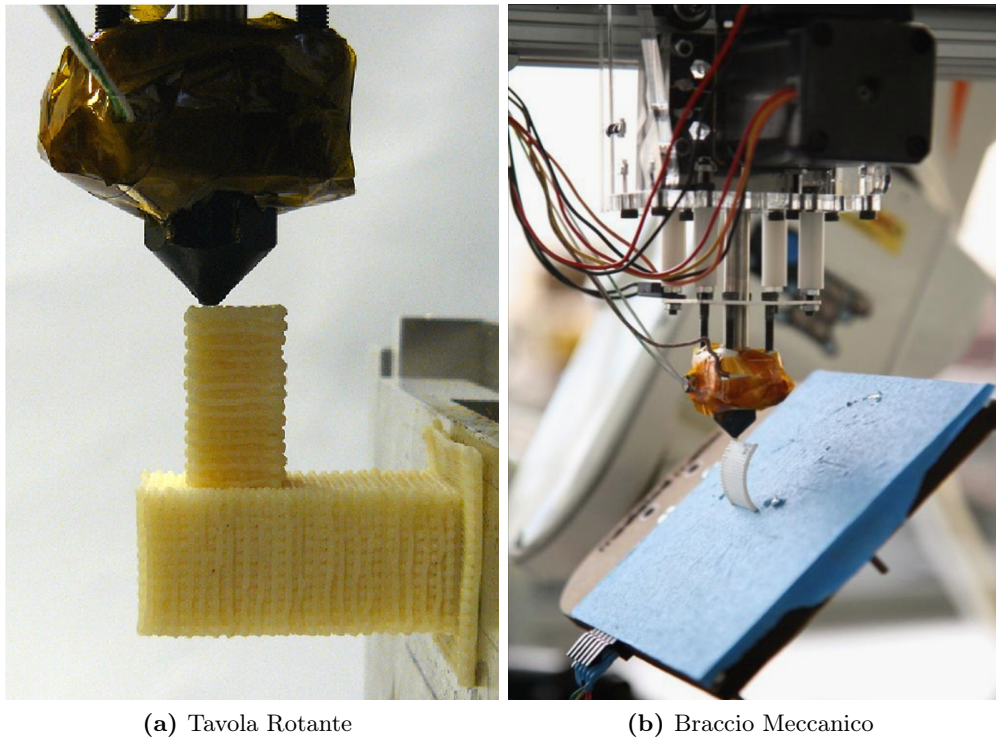


Figura 1.23: Metodi per evitare l'utilizzo di materiale di supporto

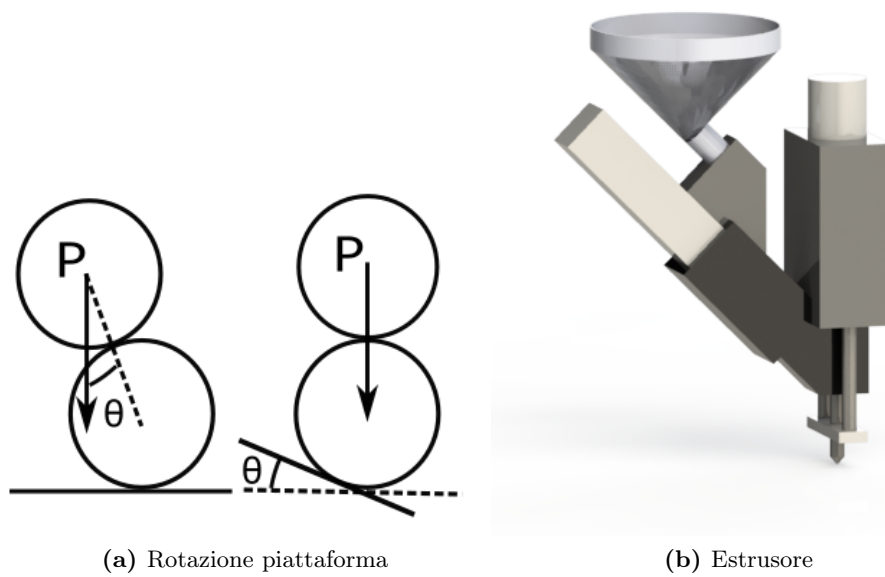


Figura 1.24: Estrusore e rotazione relativa piattaforma-vettore peso

Questa nuova tecnologia si prepone di affrontare i problemi precedentemente elencati tipici dell'Additive Manufacturing, in particolar modo si vuole limitare od eliminare l'uso di materiale di supporto e l'effetto staircase. Per affrontare questi due problemi si ha la necessità di sviluppare un robot con un numero di gradi di libertà tali da poter permettere alla piattaforma mobile di sviluppare traiettorie nuove rispetto a quelle delle classiche stampanti 3D con soli 3 gdl puramente traslazionali. Si è deciso di puntare ad una macchina a 5 assi di cui tre traslazionali e due rotazionali. Le specifiche di progetto in termini di spazio di lavoro e gdl del sistema da assegnare totalmente alla piattaforma sono così dati:

- spazio di lavoro $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}$
- 3 gdl traslazionali
- 2 gdl rotazionali, rollio e beccheggio, $\pm 45^\circ$

Il carattere innovativo della cinematica del sistema di movimentazione che permette di affrontare i problemi di staircase e materiale di supporto risiede nei gradi di rotazione della macchina. Una piattaforma in grado di ruotare permette la deposizione di materiale con un angolo di deposizione prossimo allo zero. Questo fa sì che il peso del materiale di un filo depositato sia sempre retto dal filo sottostante rendendo così da una parte inutile l'uso di materiale di supporto nel caso si debba stampare pezzi con parti a sbalzo e dall'altra migliorando la qualità superficiale del pezzo. Non si otterrebbe lo stesso risultato se si ruotasse l'iniettore al posto della piattaforma; ciò che conta non è la rotazione relativa tra piattaforma ed estrusore ma la rotazione relativa tra la piattaforma ed il vettore peso del materiale depositato come mostrato in figura 1.24a. L'innovazione della macchina risiede inoltre nell'avere i suoi gdl totalmente assegnati alla piattaforma, la quale nelle stampanti 3D industriali ha solitamente un solo grado di mobilità traslazionale.

Capitolo 2

Cinematica

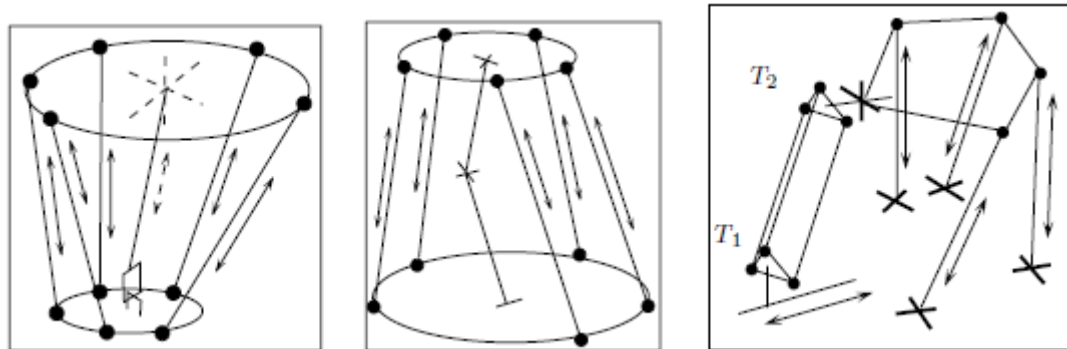
2.1 Introduzione

Date le specifiche del progetto Efesto e lo stato dell'arte dell'AM si definisce l'architettura cinematica del sistema e vengono studiati nello specifico la cinematica diretta ed inversa delle sue parti. In questo capitolo vengono spiegate le motivazioni delle scelte fatte e sono mostrati e spiegati i procedimenti di calcolo per la risoluzione matematica dei problemi cinematici affrontati. In appendice A sono presenti degli accenni di robotica che si consiglia per una migliore comprensione di quanto segue a chi sia completamente nuovo riguardo tali argomenti .

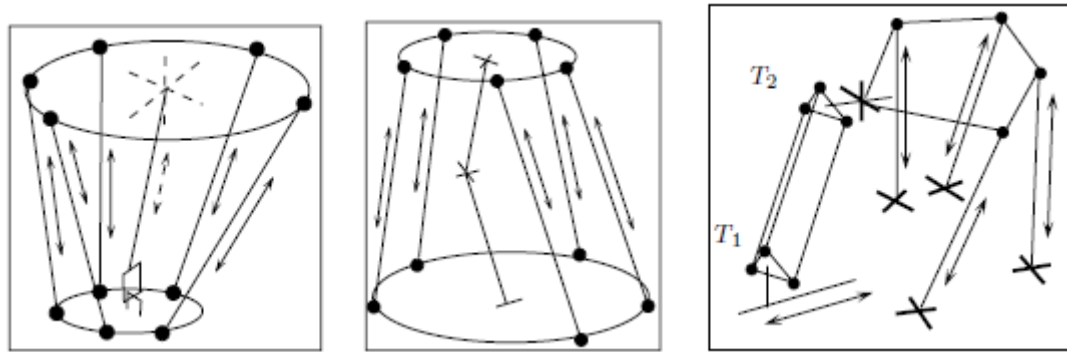
2.2 Soluzione Ibrida

Il primo problema affrontato in questo lavoro è quello di dover scegliere l'architettura cinematica da usare per coprire i 5 gdl richiesti alla macchina. Il primo distinguo va fatto tra la possibilità di usare una struttura seriale o a cinematica parallela. Si è visto come in questo campo si usi una struttura preferibilmente seriale a 3 gdl. Le macchine seriali hanno il vantaggio di avere spazi di lavoro maggiori a parità di ingombri; questo vuol dire che un robot a cinematica parallela per coprire il medesimo spazio di lavoro deve avere dimensioni maggiori. Nelle odierne stampanti 3D la soluzione seriale è conseguenza di voler rendere la macchina compatta e del fatto che la testa di estrusione, in alcune tecnologie addirittura assente, è piccola e facile da muovere. I robot a cinematica parallela hanno però il vantaggio di poter portare carichi maggiori e precisioni di posizionamento migliori grazie soprattutto ad una maggiore rigidità del sistema. L'uso di un estrusore dall'elevato peso ha fatto sì che in questo progetto si sia scelto di muovere la piattaforma che deve avere elevata precisione di posizionamento e portare tutto il carico del materiale estruso. Di conseguenza si è deciso di indirizzarsi verso una soluzione a cinematica parallela. Si è andati allora a studiare la possibilità di coprire lo spazio di lavoro con una macchina parallela con 5 gdl di cui due rotazionali. Esistono soluzioni teoriche di cinematica parallela a 5 gdl esattamente come richiesti dalle specifiche di progetto. Nel mondo industriale è alta la richiesta di macchine a 6 gdl per lavorazioni meccaniche; spesso si trovano allora macchine con effettivi 5 gdl ed il sesto attribuito all'utensile. In figura 2.1a si possono vedere delle soluzioni con sei catene cinematiche chiuse in cui una delle catene è puramente passiva e serve a vincolare il grado

di rotazione indesiderato, imbardata. In figura 2.1b sono invece visibili soluzioni con 6 catene cinematiche in cui è una delle catene attive a bloccare la rotazione indesiderata.



(a) Soluzioni cinematiche a 5gdl in cui la rotazione di imbardata è impedita o da una sesta gamba passiva o da una delle 5 gambe attive



(b) Soluzioni cinematiche a 5gdl in cui la rotazione di imbardata è impedita dalla disposizione dei giunti

Figura 2.1: Soluzioni a cinematica parallela con 5 gdl

Adottare una delle soluzioni proposte avrebbe due svantaggi fondamentali:

- limitazione dello spazio di lavoro
- richiesta di giunti che permettano ampi movimenti

Un robot a cinematica parallela ha uno spazio di lavoro generalmente piccolo in confronto alle sue dimensioni e che risulta maggiormente limitato dal momento in cui si cerca di attribuirgli un numero di gdl sempre maggiore. Questo deriva da una interferenza tra il numero di catene cinematiche crescenti che hanno maggiore probabilità di venire in contatto durante il movimento del robot. Inoltre cercando di dare una sempre maggiore mobilità alla macchine si ha bisogno di giunti passivi ed attivi in grado di fare traslazioni o rotazioni maggiori il che comporta una complicazione della fase costruttiva. Per questi motivi e la conseguente complessità progettuale che ne deriva ad oggi effettivamente non esiste commercialmente un *full parallel robot*, cioè un robot a cinematica parallela con tante catene cinematiche ed altrettanti gdl, in grado di compiere tre traslazioni e due rotazioni [27]. Per questi motivi si è scelta una soluzione modulare od ibrida che consiste nello spezzare il robot in due parti. Due soluzioni a cinematica parallela poste in serie di cui una in grado di compiere tre movimenti di traslazione ed

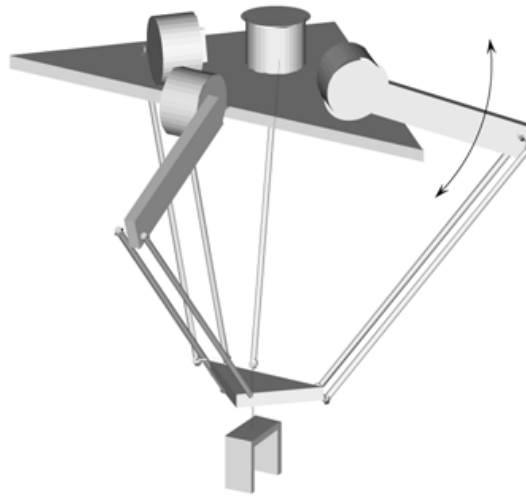


Figura 2.2: Delta Robot

una in grado di compiere le rotazioni di rollio e beccheggio. Una scelta di questo tipo, derivata dalle considerazioni descritte, comporta una serie di vantaggi:

- possibilità di passare da un sistema da 3 gdl a 5 e viceversa
- unione dei vantaggi seriali e paralleli
- semplicità di progettazione

La soluzione modulare permette di avere un robot a 3 o 5 gdl a seconda che venga montato o meno il robot che deve compiere le due rotazioni. In un'ottica di una nuova tecnica di stampa questo permette di fare prove sperimentali diverse con spazi di lavoro diversi a seconda delle necessità. Avendo due macchine in serie si riesce a ridurre lo svantaggio tipico delle macchine parallele per quanto riguarda il limite dello spazio di lavoro raggiungibile, inoltre avendo spezzato in due la soluzione si potranno studiare separatamente le due parti tenendo in conto che le rotazioni di uno dovranno essere coordinate con le traslazioni dell'altro. A questo punto il problema si traduce nel scegliere l'architettura adatta per le traslazioni e le rotazioni desiderate. L'approccio usato per scegliere le due architetture cinematiche si è basato sulla classificazione delle soluzioni tecniche esistenti in grado di svolgere i compiti richiesti e poi tra queste viene scelto il robot più idoneo a rispettare specifiche aspettative progettuali.

I robot paralleli in grado di compiere tre traslazioni si basano per la gran parte sulla struttura del *Delta* robot, figura 2.2. Questo robot è costituito da tre catene cinematiche del tipo RRP_aR , Revolute-Revolute-Parallelogram-Revolute, in grado di conferire tre traslazioni alla piattaforma finale. Della stessa famiglia è lo *Star* robot, figura 2.3a, con la differenza che questo robot al contrario del primo presenta dei vincoli ridondanti. Dal *Delta Robot* è possibile ottenere il *Linear Delta*, figura 2.3b, sostituendo al primo giunto rotoidale delle catene cinematiche un giunto prismatico. Nella famiglia dei robot paralleli con 3 gdl traslazionali infine possiamo annoverare l'*Orthoglide* robot, figura 2.4a, caratterizzato dall'aver una buona isotropia di comportamento nel proprio spazio di lavoro, e il *Tricept* derivante da un brevetto di Neumann, figura 2.4b. Le caratteristiche che il robot deve conferire alla macchina finale sono:

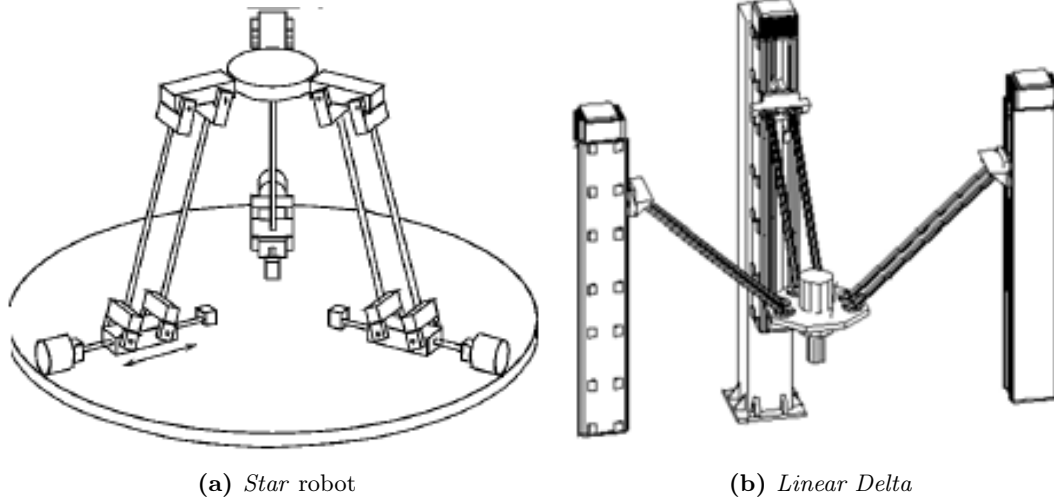


Figura 2.3: Robot *Star* e *Linear Delta*

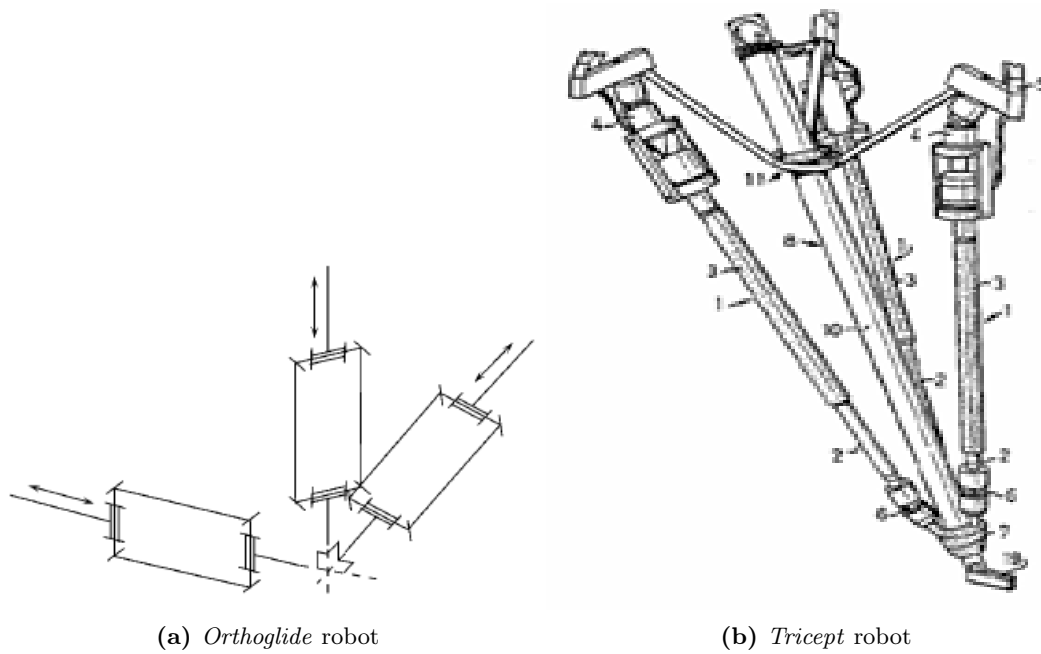


Figura 2.4: Robot *Orthoglide* e *Tricept*

- compattezza
- isotropia di comportamento

Per compattezza si intende che a parità di prestazioni e di spazio di lavoro richiesto è considerata migliore una macchina dalle dimensioni minori. L'isotropia di comportamento può essere intesa come l'attitudine del robot a comportarsi nella stessa maniera nei diversi punti dello spazio di lavoro; generalmente questo è un tratto dolente dei robot paralleli rispetto a quelli seriali, allora per limitare tale problema risulta conveniente per coprire uno spazio di lavoro con determinati assi e piani di simmetria usare un robot con una soluzione costruttiva che presenti simmetrie identiche o simili allo spazio di lavoro stesso in quanto questo porta ovviamente ad una omogeneità di comportamento della struttura in più punti di interesse possibile. L'architettura cinematica che meglio si presta ad affrontare queste problematiche risulta essere quella del *Linear Delta*. Questo è un robot dalle elevate prestazioni dinamiche che possiede il vantaggio di avere una disposizione verticale dei suoi giunti prismatici come visibile dalla figura 2.3b. Questo fatto ha una serie di conseguenze positive:

1. lo sviluppo verticale della macchina permettere di rispettare la richiesta di compattezza evitando eccessive dimensioni laterali;
2. uno sviluppo verticale permette una soluzione costruttiva ergonomica per l'operatore che si trova a lavorare sulla macchina evitando che la zona di lavoro si trova troppo in basso o troppo in alto rispetto all'operatore stesso;
3. lungo la direzione dei giunti prismatici l'unico limite alle traslazioni è dato dalla corsa delle guide lineari che realizzano tale vincolo;
4. una giusta disposizione delle guide conferisce alla macchina un certo grado di simmetria e quindi l'isotropia cercata.

Per la scelta del robot a cui attribuire le rotazioni si procede in maniera analoga a quanto fatto per il *Linear Delta* elencando le soluzioni esistenti e scegliendone una con il fondamentale vincolo che il robot rotativo deve essere montato sopra il *Linear Delta* e per questo è molto importante che abbia una soluzione costruttiva facilmente integrabile con quest'ultimo. Il *Linear Delta* muove una piattaforma sulla quale si vuole porre il robot che ruota la piattaforma finale dove viene depositato il materiale dall'estrusore. In figura 2.5 possiamo vedere tre possibili soluzioni cinematiche. Ognuna di queste si riferisce a tre gdl rotazionali ma è possibile ottenere i 2 gdl richiesti usando solo 2 catene cinematiche con opportune modifiche. Tra questi robot quello che si presta meglio ad essere unito al *Linear Delta* è il polso sferico di Gosselin, figura 2.5b, detto anche *Agile Eye*. L'*Agile Eye* si presta bene al lavoro scelto in quanto le rotazioni richieste sono eseguite attraverso dei bracci messi in rotazione da dei motori elettrici che possono essere poggiati sopra la piattaforma che viene mossa dal *Linear Delta*. Ben più complesso e oneroso, per il lavoro del *Linear Delta* che deve sorreggere tutta la struttura sovrastante, sarebbe l'utilizzo delle altre due soluzioni cinematiche proposte che presuppongono l'utilizzo di attuatori lineari, figura 2.5a, o l'utilizzo di catene cinematiche più lunghe, figura 2.5c.

Alla fine di questo studio le due architetture cinematiche scelte sono quella del *Linear Delta* per le traslazioni e quella dell'*Agile Eye* per le rotazioni. I due robot vengono posti

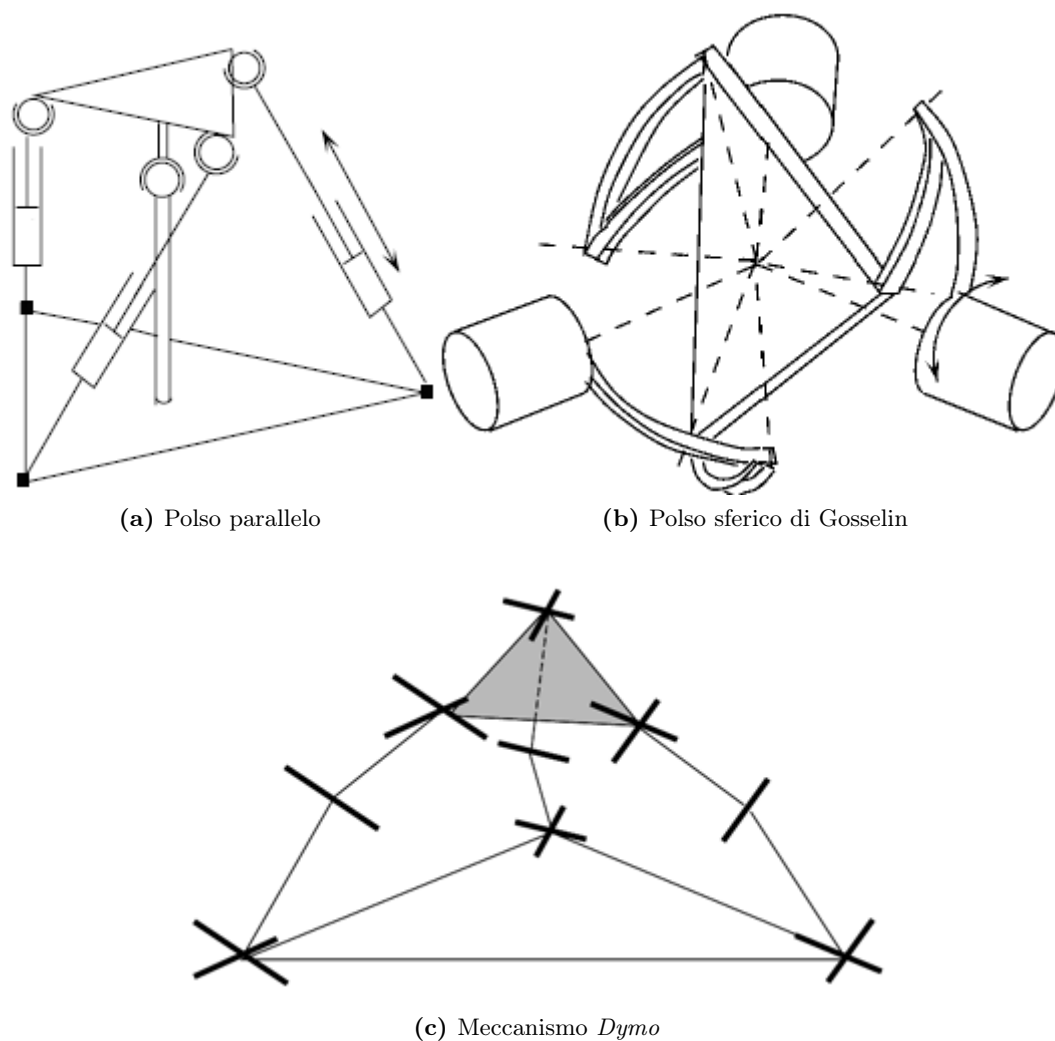


Figura 2.5: Polsi sferici

in serie a formare una soluzione ibrida in grado di garantire i 5 gdl richiesti. Da notare come l'*Agile Eye* deve essere opportunamente modificato per ottenere due rotazioni e non tre. Il principio cinematico che sta alla base del robot non cambia.

2.3 Analisi Cinematica del Linear Delta

Il *Linear Delta* è un robot a cinematica parallela in grado di compiere tre traslazioni. Il robot è composto tra tre catene cinematiche del tipo PUS (Prismatic-Universal-Spherical). Si può fare riferimento alla figura 2.6 per comprendere lo schema base di questo robot. La struttura di base è composta da 7 corpi escluso il telaio, cioè la parte considerata come sistema di riferimento assoluto. Abbiamo poi 3 corpi in grado di compiere spostamenti lineari che saranno chiamati slider, tre link ed una piattaforma. Gli slider possono scorrere grazie ai giunti prismatici lungo delle rette che nella pratica sono realizzati attraverso delle guide lineari. I link sono collegati da un lato agli slider attraverso il giunto universale che consente due rotazioni ed impedisce al link di ruotare

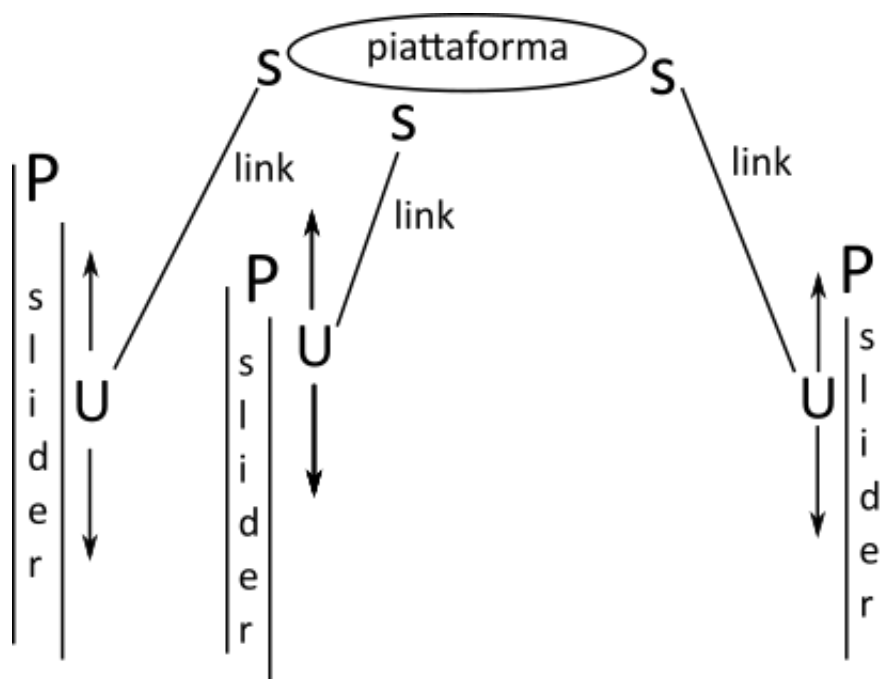


Figura 2.6: Schema PUS del *Linear Delta*

attorno al proprio asse, e dall'altro alla piattaforma attraverso un giunto sferico che consente qualsiasi tipo di rotazione relativa. Nella pratica per impedire ogni tipo di rotazione della piattaforma i link vengono realizzati attraverso una struttura a parallelogramma che realizza due vincoli universali. Più avanti si scenderà maggiormente nel dettaglio nella spiegazione di questo parallelogramma, in ogni caso la cinematica del robot non viene alterata da questo cambiamento costruttivo. Si possono facilmente trovare in letteratura riferimenti alla cinematica di questo sistema [28]. Per lo sviluppo del progetto sono necessarie la risoluzione sia della cinematica inversa che della cinematica diretta, cioè bisogna essere in grado di trovare la posizione degli slider data una posizione della piattaforma e di trovare la posizione della piattaforma data la posizione degli slider.

2.3.1 Cinematica inversa e diretta

Per la cinematica inversa si impone la posizione della piattaforma o meglio di un suo punto, il TCP (Tool Center Point). Le tre coordinate di questo punto bastano a definire la piattaforma nello spazio in quanto la piattaforma può solo traslare. Si sceglie come TCP il centro della piattaforma; questa scelta arbitraria poteva essere cambiata con qualsiasi altro punto solidale alla piattaforma stessa. Da ora in avanti per meglio comprendere le equazioni vettoriali con cui si arriva alla soluzione matematica del problema si faccia riferimento alla notazione data in tabella 2.1 riferita alla figura 2.7.

La risoluzione matematica della cinematica inversa può essere facilmente compresa guardando la figura 2.7. Definita la posizione del TCP sono perfettamente noti i vettori \underline{p} , \underline{b}_i e \underline{s}_i , che esprimono rispettivamente la posizione del TCP, dei vincoli sferici rispetto al TCP e la posizione iniziale degli slider. Dati questi si vede come si può ottenere il vettore \underline{d}_i che unisce la posizione iniziale dello slider i -esimo al giunto i -esimo sulla piattaforma. A questo punto perché il sistema ammetta una configurazione compatibile

Simbolo	Significato
$O-xyz$	Sistema di riferimento globale
$\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$	Versori del sistema di riferimento globale
$TCP-xyz$	Sistema di riferimento locale solidale alla piattaforma
$\hat{x}', \hat{y}', \hat{z}'$	Versori del sistema locale di riferimento
TCP	tool center point
A_i	i -esimo centro dei giunti universali
B_i	i -esimo centro dei giunti sulla piattaforma
$p = \{x_p, y_p, z_p\}^T$	Coordinate del TCP
\underline{b}_i	Vettore del i -esimo giunto di piattaforma
$\underline{l}_i = l_i \hat{n}_i$	Vettore del i -esimo link (modulo e versore)
$\underline{s}_i = \{s_{i,x}, s_{i,y}, 0\}^T$	Vettore posizione della i -esima guida
q_i	Coordinate del i -esimo slider
\hat{u}_i	Versore della i -esima guida
$[J]$	Matrice Jacobiana

Tabella 2.1: Simboli usati nella risoluzione del problema cinematico.

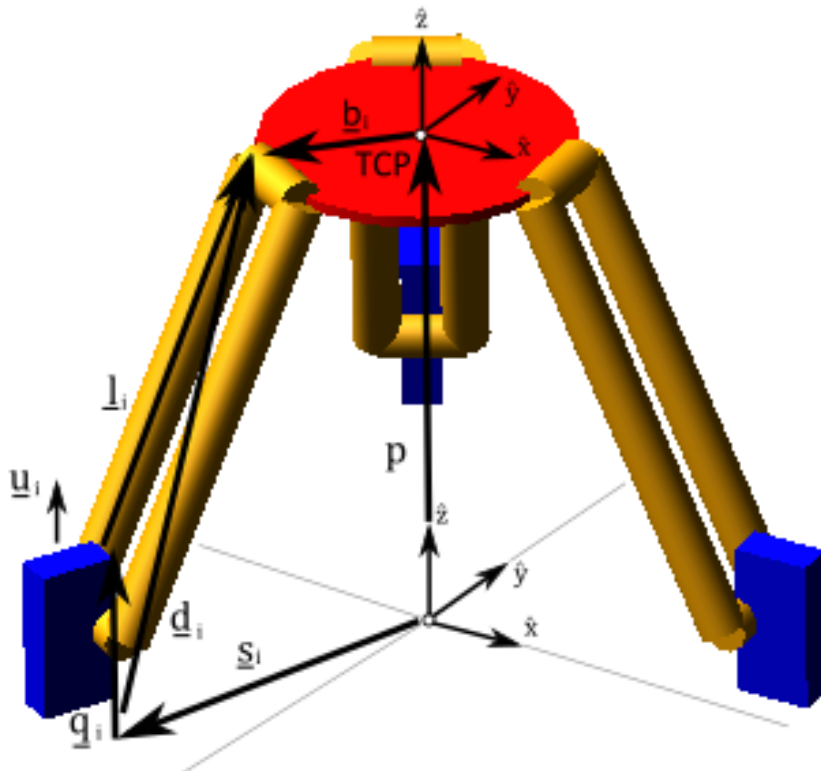


Figura 2.7: Modello del *Linear Delta*

con la posizione del TCP scelta deve esistere uno spostamento dello slider q_i tale che il link di lunghezza fissa sia in grado di rimanere collegato da una parte allo slider e dall'altra alla piattaforma, e questo deve essere simultaneamente vero per tutti e tre i link. Le equazioni che esprimono quanto detto sono:

$$\underline{d}_i = \underline{p} + \underline{b}_i - \underline{s}_i \quad (2.1)$$

$$l_i = \underline{d}_i - q_i \hat{u}_i \quad (2.2)$$

$$l_i^2 = \underline{l}_i^T \underline{l}_i = (\underline{d}_i - q_i \hat{u}_i)^T (\underline{d}_i - q_i \hat{u}_i) = \underline{d}_i^T \underline{d}_i - 2\underline{d}_i^T \hat{u}_i q_i + q_i^2 \quad (2.3)$$

$$q_i = \underline{d}_i^T \hat{u}_i - \sqrt{\underline{d}_i^T (\hat{u}_i \hat{u}_i^T - [I]) \underline{d}_i + l_i^2} \quad i = 1, 2, 3 \quad (2.4)$$

L'equazione 2.4 non ammette soluzione quando il termine sotto radice diventa negativo. Questo caso esprime l'impossibilità del link di raggiungere sia lo slider che la piattaforma simultaneamente.

Per la cinematica diretta il problema viene impostato in maniera opposta. Ora note le posizioni degli slider si vuole conoscere la posizione della piattaforma. Questo problema matematicamente è notoriamente più difficile da risolvere per i robot a cinematica parallela, infatti mentre per un robot seriale comunque venga definito uno spostamento o una rotazione dei vari giunti dei corpi collegati in serie si raggiunge una certa posizione dell'*end effector*, questo non è garantito nei robot a cinematica parallela. In ogni caso per il *Linear Delta* è possibile giungere a una soluzione in forma chiusa della cinematica diretta.

La soluzione che viene proposta fa riferimento ad una disposizione particolare delle guide poste a 120° l'una dall'altra. Durante lo svolgimento dell'ottimizzazione cinematica si comprenderà meglio questa disposizione. In ogni caso con gli stessi passaggi si può arrivare alla soluzione cinematica per disposizioni differenti.

Le equazioni che portano alla soluzione sono:

$$\underline{d}_i = \underline{p} + \underline{b}_i - \underline{s}_i \quad (2.5)$$

$$\underline{d}_i^T \underline{d}_i = \underline{p}^T \underline{p} + \underline{b}_i^T \underline{b}_i + \underline{s}_i^T \underline{s}_i + 2\underline{p}^T \underline{b}_i + -2\underline{p}^T \underline{s}_i - 2\underline{b}_i^T \underline{s}_i \quad (2.6)$$

$$l_i^2 = \underline{d}_i^T \underline{d}_i - 2\underline{d}_i^T \hat{u}_i q_i + q_i^2 \quad (2.7)$$

Sostituendo l'equazione 2.6 nella 2.7 si ha:

$$\underline{p}^T \underline{p} + \underline{b}_i^T \underline{b}_i + \underline{s}_i^T \underline{s}_i + 2\underline{p}^T \underline{b}_i - 2\underline{p}^T \underline{s}_i - 2\underline{b}_i^T \underline{s}_i - 2q_i p_z + q_i^2 - l_i^2 = 0 \quad (2.8)$$

Considerando una disposizione delle guide a 120° ¹ e tenendo conto che R_p e s sono rispettivamente i moduli di \underline{b}_i ed \underline{s}_i si può scrivere:

¹Viene qui proposta la soluzione relativa alla disposizione finale delle guide ricavate durante l'ottimizzazione cinematica. Il procedimento e le equazioni descritte non perdono di generalità potendo essere facilmente riscritte per qualsiasi altra disposizione.

$$\begin{cases} \underline{p}^T \underline{b}_i = p_x R_p \cos\left(\frac{2(i-1)\pi}{3}\right) + p_y R_p \sin\left(\frac{2(i-1)\pi}{3}\right) \\ \underline{p}^T \underline{s}_i = p_x s \cos\left(\frac{2(i-1)\pi}{3}\right) + p_y s \sin\left(\frac{2(i-1)\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (2.9)$$

Se si svolgono tutti i prodotti scalari dell'equazione 2.8 si ottiene:

$$p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 + 2(R_p - s) \cos\left(\frac{2(i-1)\pi}{3}\right) p_x + 2(R_p - s) \sin\left(\frac{2(i-1)\pi}{3}\right) p_y - 2q_i p_z + (R_p - s)^2 + q_i^2 - l^2 = 0 \quad (2.10)$$

Moltiplicando per 2 quest'equazione con $i = 1$ e sottraendovi se stessa con $i = 2$ e $i = 3$ si ha:

$$6(R_p - s)p_x - 2(2q_1 - q_2 - q_3)p_z + 2q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 = 0 \quad (2.11)$$

E sottraendo all'equazione 2.10 con $i = 3$ la stessa equazione con $i = 2$:

$$2\sqrt{3}(R_p - s)p_y - 2(q_2 - q_3)p_z + q_2^2 - q_3^2 = 0 \quad (2.12)$$

Queste due equazioni definiscono una relazione lineare tra p_x e p_z e tra p_y e p_z . Se le espressioni di p_x e p_y in funzione di p_z sono sostituite nell'equazione 2.10 con $i = 5$ si ottiene un'equazione di secondo grado in p_z :

$$k_1 p_z^2 + k_2 p_z + k_3 = 0 \quad (2.13)$$

Dove i termini k_1 , k_2 e k_3 sono:

$$\begin{aligned} k_1 &= \frac{(2q_1 - q_2 - q_3)^2 + 3(q_2 - q_3)^2}{9(R_p - s)^2} + 1 \\ k_2 &= \frac{3(q_2 - q_3)(q_3^2 - q_2^2) - (2q_1 - q_2 - q_3)(2q_1^2 - q_2^2 - q_3^2)}{9(R_p - s)^2} + \frac{2(2q_1 - q_2 - q_3)}{3} - 2q_1 \\ k_3 &= \frac{3(q_2^2 - q_3^2)^2 + (2q_1^2 - q_2^2 - q_3^2)^2}{36(R_p - s)^2} - \frac{(2q_1^2 - q_2^2 - q_3^2)}{3} + (R_p - s)^2 + q_1^2 - l^2 \end{aligned} \quad (2.14)$$

Dall'equazione 2.13 si ottengono due soluzioni relative a due possibili soluzioni di montaggio. Il valore finale di p_z è:

$$p_z = \frac{-k_2 \pm \sqrt{k_2^2 - 4k_1 k_3}}{2k_1} \quad (2.15)$$

I valori di p_x e p_y si possono infine ottenere dalle equazioni 2.11 e 2.12.

2.3.2 Analisi delle velocità

Per lo studio del robot non è solamente importante conoscere le relazioni cinematiche della struttura ma anche le relazioni che legano la velocità dell'*end effector* alle velocità degli attuatori, cioè gli organi che controllano i gradi di libertà del robot in modo da imporgli il moto desiderato. Conoscere queste relazioni è fondamentale per poter verificare in fase di progettazione che le velocità richieste all'*end effector* non si amplifichino

in maniera elevata sugli attuatori. Nel nostro caso gli attuatori saranno tre motori elettrici che metteranno in movimento i tre slider. Un rapporto elevato tra le velocità della piattaforma e quello degli slider imporrebbe una velocità elevata di rotazione da parte dei motori che potrebbe non essere raggiungibile.

Le relazioni tra le velocità si ottengono da una derivazione nel tempo delle equazioni cinematiche. Derivando l'equazione 2.3 si ottiene la seguente espressione:

$$2\underline{d}_i^T \dot{\underline{d}}_i - 2\underline{d}_i^T \hat{u}_i \dot{q}_i - 2q_i \hat{u}_i^T \dot{\underline{d}}_i + 2\dot{q}_i q_i = 0 \quad (2.16)$$

Che può essere riscritta come:

$$(\underline{d}_i - \hat{u}_i q_i)^T (\dot{\underline{d}}_i - \hat{u}_i \dot{q}_i) = 0 \quad (2.17)$$

Dove si riconosce che il primo termine è il vettore del i -esimo link:

$$\underline{l}_i^T (\dot{\underline{d}}_i - \hat{u}_i \dot{q}_i) = 0 \quad (2.18)$$

Il termine \underline{d}_i è uguale a \underline{p} , essendo sia \underline{b}_i che \underline{s}_i costanti. Abbiamo:

$$\underline{l}_i^T (\hat{u}_i \dot{q}_i - \underline{p}) = 0 \quad (2.19)$$

ed esprimendo \underline{l}_i come $l_i \hat{n}_i$ e dividendo l'equazione per il modulo l_i :

$$\hat{n}_i^T \hat{u}_i \dot{q}_i - \hat{n}_i^T \underline{p} = 0 \quad (2.20)$$

Se si considerano tutte e tre le catene cinematiche è possibile esprimere queste equazioni in forma matriciale:

$$diag(\hat{n}_1^T \hat{u}_1, \dots, \hat{n}_3^T \hat{u}_3) \dot{\underline{q}} - [J_{gs}]^{-1} \underline{p} = \underline{0} \quad (2.21)$$

dove:

$$[J_{gs}]^{-1} = \begin{bmatrix} \hat{n}_1^T \\ \hat{n}_2^T \\ \hat{n}_3^T \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

e quindi possiamo esplicitare la matrice Jacobiana inversa:

$$[J]^{-1} = diag(\hat{n}_1^T \hat{u}_1, \dots, \hat{n}_3^T \hat{u}_3)^{-1} [J_{gs}]^{-1} \quad (2.23)$$

Che riscritta in forma estesa:

$$[J]^{-1} = [J_q]^{-1} [J_{gs}]^{-1} = diag(1/n_{i,z}) \begin{bmatrix} \hat{n}_1^T \\ \hat{n}_2^T \\ \hat{n}_3^T \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

La matrice Jacobiana mi esprime i legami tra le velocità della piattaforma $\mathbf{W} = \{\dot{p}_x, \dot{p}_y, \dot{p}_z\}^T$ e le velocità degli slider $\dot{\mathbf{q}} = \{\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dot{q}_3\}^T$. Per la cinematica inversa e diretta valgono le relazioni:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{q}} &= [J]^{-1} \mathbf{W} \\ \mathbf{W} &= [J] \dot{\mathbf{q}} \end{aligned} \quad (2.25)$$

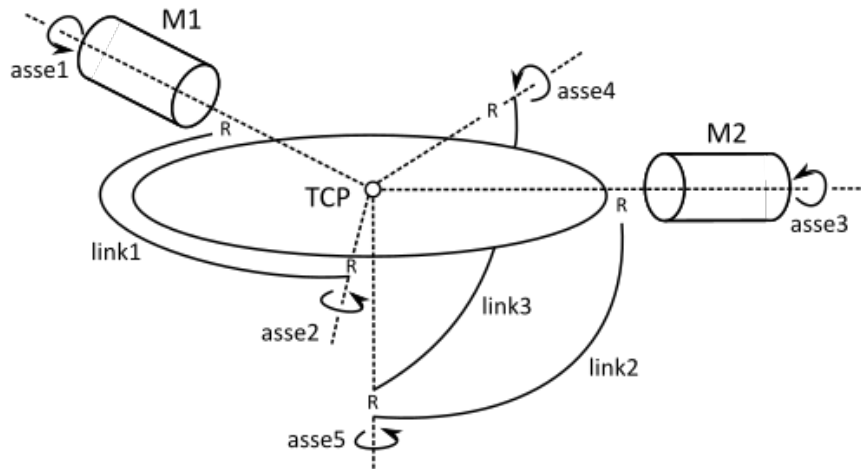


Figura 2.8: Schema dell'Agile Eye con 2 gdl

2.4 Analisi Cinematica dell'Agile Eye

L'Agile Eye è un robot a cinematica parallela in grado di compiere fino a tre rotazioni, in questo caso possiede due gdl rotazionali, rollio e beccheggio, attuati grazie a due catene cinematiche. Si faccia riferimento alla figura 2.8 dove gli elementi di collegamento tra motori e piattaforma sono stati denominati link1, link2 e link3. Le due catene cinematiche non sono identiche; una è composta dal solo link1 che collega il motore M1 alla piattaforma, l'altra è composta dal link2 e link3 che portano a collegare il motore M2 alla piattaforma. Il link1 può ruotare attorno all'asse1 solidalmente al motore e relativamente alla piattaforma attorno all'asse2. Il link2 può ruotare attorno all'asse3 solidalmente con il motore e relativamente al link3 attorno all'asse5. Infine il link3 può ruotare attorno all'asse4 relativamente alla piattaforma. Perché il meccanismo compia solamente rotazioni si ha bisogno che tutti gli assi di rotazione della macchina, cioè gli assi di tutti i vincoli revolute(R), cerniere che permettono un'unica rotazione relativa, devono incontrarsi in un unico punto che sarà il centro di rotazione della macchina e che andiamo a scegliere per questo robot come TCP. Da notare come nella configurazione mostrata 4 dei 5 assi poggiano sullo stesso piano mentre il quinto, l'asse5 appartenente al revolute che collega link2 e link3, è ortogonale a tale piano. Questa è una possibile scelta ed è quella che sarà seguita in questo lavoro derivante dalla scelta di vincolare i motori sulla piattaforma mossa dal *Linear Delta*; niente vieta a livello cinematico una qualsiasi altra disposizione spaziale purchè gli assi si incontrino in uno stesso punto ma la soluzione proposta va incontro alla richiesta di integrabilità costruttiva per la quale l'Agile Eye è stato scelto. Per la risoluzione cinematica del robot come nel caso del *Linear Delta* si può far affidamento alla letteratura [29], [30]. Partendo da questa si è ricavata la soluzione della cinematica inversa prima e conseguentemente di quella diretta.

Con la risoluzione della cinematica inversa andiamo a trovare le relazioni tra le rotazioni della piattaforma, rollio e beccheggio che vengono indicate con α e β , e le rotazioni dei due motori, indicate con θ_1 e θ_2 . Per trovare le equazioni che legano queste variabili sono usate le matrici di posa. Le matrici di posa sono matrici descrittive della posizione relativa tra due corpi; se si vuole risolvere una catena cinematica si può

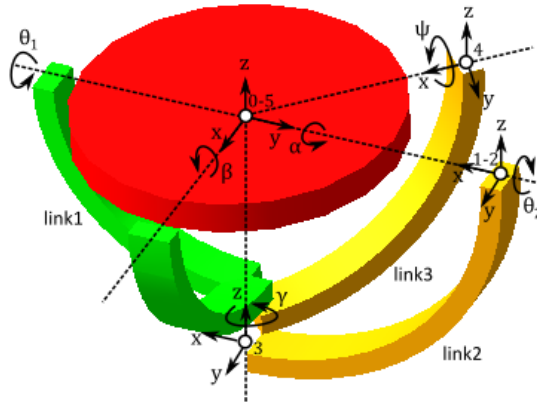


Figura 2.9: Modello dell'Agile Eye

associare ad ogni corpo della catena stessa una terna ad esso solidale i cui spostamenti relativi immediatamente adiacenti sono descritti da apposite matrici di posa. Data un corpo 0 ed un corpo 1 la matrice di posa che mi permette di passare dal sistema di riferimento di 1 a quello di 0 verrà chiamata matrice M_{01} . Facendo riferimento alla figura 2.9, in cui è rappresentata la soluzione cinematica scelta per l'Agile Eye, si può notare come nonostante ci siano due catene cinematiche solo una di queste deve essere risolta da un punto di vista matematico. La catena relativa al primo motore e al link1 è di intuitiva risoluzione. La rotazione θ_1 è sempre uguale e coincidente ad α . La seconda catena cinematica, data dal secondo motore e dal link2 e link3 viene risolta facendo uso di 5 sistemi di riferimento, ognuno numerato in figura. Un riferimento fisso, 0, che viene posto nel TCP; un riferimento 1 posizionato nel centro di rotazione del link2 ma fisso rispetto al terreno e un sistema di riferimento 2 posizionato nello stesso punto ma solidale al motore e quindi in grado di ruotare attorno all'asse x del sistema 1; il riferimento 3 è legato al link3 e può ruotare attorno all'asse z del riferimento 3; un riferimento 4 legato sempre al link3 ma libero di ruotare attorno all'asse x ed infine un riferimento 5 che è solidale alla piattaforma e che nella posizione iniziale è sovrapposto al riferimento fisso 0. I movimenti concessi nella catena cinematica sono le tre rotazioni θ_2 , del motore e quindi del link2 che gli è solidale, γ che descrive la rotazione relativa del link3 rispetto al link2 e ψ , rotazione relativa della piattaforma rispetto al link3. Imponendo la chiusura cinematica di questa catena ed imponendo l'uguaglianza della soluzione con quella di una matrice di rotazione che descrive le rotazioni α e β della piattaforma si può arrivare alla soluzione della cinematica inversa. Prima di tutto scriviamo la matrice $M_{\alpha\beta}$ che non è altro una matrice di rotazione basata sugli angoli nautici in cui manca la rotazione di imbardata. I termini $c\alpha$ e $s\alpha$ si intendono per $\cos\alpha$ e $\sin\alpha$.

$$\mathbf{M}_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} c\alpha & sas\beta & sac\beta & 0 \\ 0 & c\beta & -s\beta & 0 \\ -s\alpha & cas\beta & cac\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Di seguito invece sono riportate le 5 matrici che mi portano dal sistema di riferimento fisso, 0, al sistema 5 solidale con la piattaforma passando attraverso la catena cinematica.

Da notare come link2 e link3 sono separati nella posizione iniziale da un angolo di $45^{\circ 2}$, questo comporta nelle matrici la presenza dei termini $c45$ e $s45$. Con il termine R si indica il raggio dei link che non sono altro che quarti di cerchio. Anche se nella realtà costruttiva questi hanno raggi differenti da un punto di vista cinematico li si può considerare tutti uguali evitando l'introduzione di termini di traslazione inutili per il risultato finale.

$$\mathbf{M}_{01} = \begin{bmatrix} -c90 & s90 & 0 & 0 \\ -s90 & -c90 & 0 & R \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

$$\mathbf{M}_{12} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c\theta_2 & -s\theta_2 & 0 \\ 0 & s\theta_2 & c\theta_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

$$\mathbf{M}_{23} = \begin{bmatrix} c\gamma & -s\gamma & 0 & R \\ s\gamma & c\gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -R \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

$$\mathbf{M}_{34} = \begin{bmatrix} c45 & -c\psi s45 & s\psi s45 & -Rc45 \\ s45 & c\psi c45 & -s\psi c45 & -Rs45 \\ 0 & s\psi & c\psi & R \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

$$\mathbf{M}_{45} = \begin{bmatrix} c45 & -s45 & 0 & R \\ s45 & c45 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

Moltiplicando in ordine tali matrici si ottiene la matrice in grado di legare il riferimento solidale alla piattaforma con il riferimento fisso. Con il termine cs si indicherà indifferentemente il coseno o il seno di 45° , inoltre si indicherà con i termini cp , cm , sp , sm rispettivamente $c\gamma(1 + c\psi)$, $c\gamma(1 - c\psi)$, $s\gamma(1 + c\psi)$ e $s\gamma(1 - c\psi)$.

$$\mathbf{M}_{05} = \begin{bmatrix} c\theta_2 cs^2[sm + cp] - s\theta_2 s\psi cs & -c\theta_2 cs^2[cm + sp] - s\theta_2 s\psi cs & c\theta_2 cs[s\gamma s\psi - c\gamma s\psi] - s\theta_2 c\psi & 0 \\ -cs^2 cm + cs^2 sp & cs^2[-sm + cp] & -cs[c\gamma s\psi + s\gamma s\psi] & 0 \\ s\theta_2 cs^2[sm + cp] + c\theta_2 s\psi cs & -s\theta_2 cs^2[cm + sp] + c\theta_2 s\psi cs & s\theta_2 cs[s\gamma s\psi - c\gamma s\psi] + c\theta_2 c\psi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

Uguagliando gli elementi della matrice 3x3 data dalle prime 3 righe e dalle prime 3 colonne della matrice \mathbf{M}_{05} con gli elementi in ugual posizione della matrice $\mathbf{M}_{\alpha\beta}$ si ottengono 9 equazioni scalari non lineari. Di queste per arrivare a legare θ_2 con α e β si possono usare le 4 equazioni in posizione (1,1),(3,1),(1,2) e (3,2).

²Anche per l'*Agile Eye* come per il *Linear Delta* viene preposta la soluzione finale scelta in fase di ottimizzazione cinematica

$$c\alpha = c\theta_2 c s^2 [sm + cp] - s\theta_2 s\psi cs \quad (2.33)$$

$$-s\alpha = s\theta_2 c s^2 [sm + cp] + c\theta_2 s\psi cs \quad (2.34)$$

$$s\alpha s\beta = -c\theta_2 c s^2 [cm + sp] - s\theta_2 s\psi cs \quad (2.35)$$

$$c\alpha s\beta = -s\theta_2 c s^2 [cm + sp] + c\theta_2 s\psi cs \quad (2.36)$$

Isolando il termine $[sm + cp]$ dalle equazioni 2.33 e 2.34, ed il termine $[cm + sp]$ dalle equazioni 2.35 e 2.36 si ottiene:

$$\frac{c\alpha + s\theta_2 s\psi cs}{c\theta_2} = \frac{-s\alpha - c\theta_2 s\psi cs}{s\theta_2} \quad (2.37)$$

$$\frac{s\alpha s\beta + s\theta_2 s\psi cs}{c\theta_2} = \frac{c\alpha s\beta - c\theta_2 s\psi cs}{s\theta_2} \quad (2.38)$$

$$(2.39)$$

Isolando infine il termine $s\psi cs$ si arriva ad ottenere l'equazione finale:

$$\theta_2 = \arctan\left(\frac{s\alpha - c\alpha s\beta}{s\alpha s\beta - c\alpha}\right) \quad (2.40)$$

Si noti come nel caso β sia uguale a zero θ_2 sia uguale ad α . Le rotazioni dei due motori differiscono, in modulo, solo quando si vuole imporre una rotazione in β non nulla. Alla fine riassumendo nel complessivo le relazioni cinematiche inverse tra le rotazioni della piattaforma e le rotazioni dei motori si può scrivere:

$$\begin{cases} \theta_1 = \alpha \\ \theta_2 = \arctan\left(\frac{s\alpha - c\alpha s\beta}{s\alpha s\beta - c\alpha}\right) \end{cases} \quad (2.41)$$

Invertendo tali relazioni si possono ottenere le equazioni della cinematica diretta:

$$\begin{cases} \alpha = \theta_1 \\ \beta = \arcsin\left(\frac{s\alpha + c\alpha \tan\theta_2}{\tan\theta_2 s\alpha + c\alpha}\right) \end{cases} \quad (2.42)$$

2.4.1 Analisi delle velocità

Partendo dalle equazioni della cinematica inversa e derivandole rispetto al tempo si può ottenere lo Jacobiano inverso:

$$\begin{Bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{s\beta^2 - 1}{1 + s\beta^2 - 4s\alpha c\alpha s\beta} & \frac{c\beta^2 (c\alpha^2 - s\alpha^2)}{1 + s\beta^2 - 4s\alpha c\alpha s\beta} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \end{Bmatrix} \quad (2.43)$$

$$\dot{\mathbf{\theta}} = [J]^{-1} \mathbf{W} \quad (2.44)$$

È possibile ricavare in maniera analitica lo Jacobiano diretto dalla derivazione delle equazioni cinematiche dirette nel loro campo di applicabilità.

$$\mathbf{W} = [J] \dot{\mathbf{\theta}} \quad (2.45)$$

$$[J] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1 - \tan^2 \theta_2}{\sqrt{\tan^2 \theta_2 (s\theta_1^2 - c\theta_1^2) + c\theta_1^2 - s\theta_1^2 (\tan \theta_2 s\theta_1 + c\theta_1)^2}} & \frac{c\theta_1^2 - s\theta_1^2}{c\theta_2^2 \sqrt{\tan^2 \theta_2 (s\theta_1^2 - c\theta_1^2) + c\theta_1^2 - s\theta_1^2 (\tan \theta_2 s\theta_1 + c\theta_1)^2}} \end{bmatrix} \quad (2.46)$$

2.4.2 Approccio geometrico

Anche se l'uso delle matrici di posa ha portato ad una soluzione delle cinematica, sia inversa che diretta, si vuole mostrare un altro possibile metodo basato puramente sulla geometria del sistema per trovare la soluzione della cinematica inversa. Come nel caso delle matrici di posa l'unica incognita è la rotazione del secondo motore in quanto il primo ha una rotazione pari ad α . Guardando alla figura 2.10 si può notare come una volta definita la posizione della piattaforma i link 2 e 3 possono solamente ruotare attorno a degli assi passanti per il TCP; per il link3 si tratta dell'asse imposto dal vincolo tra revolute e piattaforma mentre per il link2 dell'asse fisso dato dal motore 2. A questo punto il problema cinematico può essere visto come la ricerca delle intersezioni tra i due cerchi immaginari su cui poggiano i link. Avendo i due cerchi sempre lo stesso centro, il TCP, esistono almeno due punti di intersezione, la soluzione dipende dalla scelta di montaggio. Per impostare il problema da un punto di vista matematico si deve

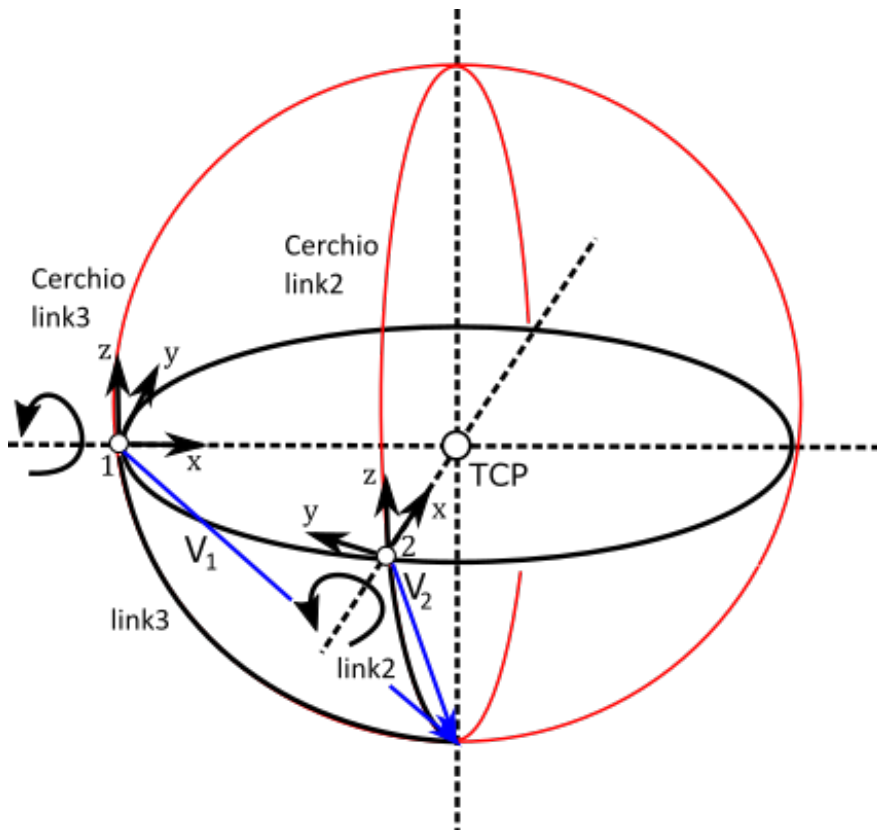


Figura 2.10: Approccio geometrico

risolvere la seguente equazione vettoriale:

$$P_1 + [R_1]V_1' = P_2 + [R_2]V_2' \quad (2.47)$$

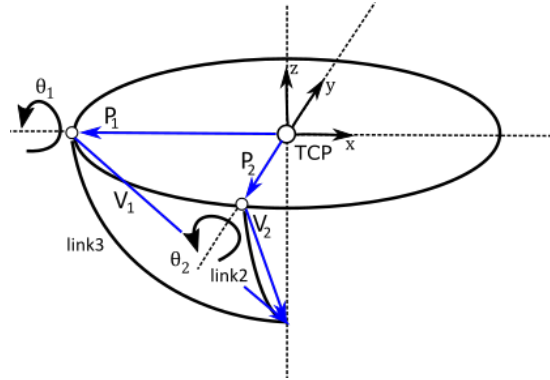


Figura 2.11: Disegno dell'equazione cinematica dell'approccio geometrico

Il significato di tale equazione è meglio comprensibile dalla figura 2.11. I vettori P_1 e P_2 definiscono la posizione dei sistemi di riferimento 1 e 2 rispetto ad un riferimento fisso posto nel TCP. Il sistema 1 è solidale alla piattaforma mentre il sistema 2 è fisso. I vettori V'_1 e V'_2 sono i vettori V_1 e V_2 espressi nei due riferimenti suddetti che grazie alle matrici $[R_1]$ ed $[R_2]$ vengono riespressi in un sistema di riferimento fisso posizionato nel TCP rispetto al quale è scritta l'intera equazione cinematica. Questi due vettori non sono altro che i due link, ai fini della risoluzione cinematica non è necessario vedere i link come quarti di cerchio. Il fatto di usare i riferimenti 1 e 2 permette di poter esprimere i due vettori nella forma:

$$V'_1 = \begin{Bmatrix} V_{1x} \\ \rho_1 \cos \theta_1 \\ \rho_1 \sin \theta_1 \end{Bmatrix} \quad V'_2 = \begin{Bmatrix} V_{2x} \\ \rho_2 \cos \theta_2 \\ \rho_2 \sin \theta_2 \end{Bmatrix} \quad (2.48)$$

La posizione nello spazio dei due vettori è assolutamente definita trovati i parametri θ_1 e θ_2 incognite del problema. Questi due angoli definiscono la rotazione dei due vettori rispetto ai propri assi di rotazione. Di questi due angoli quello legato al link2, θ_2 , coincide con la rotazione del motore che si vuole trovare; il termine θ_1 in questo caso esprime la rotazione relativa del link3 rispetto alla piattaforma. Da notare come nei sistemi di riferimento scelti il termine lungo x dei due vettori è costante come è costante il modulo delle altre due componenti. Nella realizzazione applicativa del robot queste lunghezze sono diverse tra i due link ma sempre nell'ambito della risoluzione cinematica possono essere prese uguali senza alterare il risultato. Le matrici $[R_1]$ e $[R_2]$ sono composte dai versori dei sistemi di riferimento 1 e 2 espressi nel sistema di riferimento assoluto. Anche questi sono termini noti dati la posizione della piattaforma.

$$[R_1] = [\hat{x}_1, \hat{y}_1, \hat{z}_1] \quad [R_2] = [\hat{x}_2, \hat{y}_2, \hat{z}_2] \quad (2.49)$$

L'equazione vettoriale 2.47 esprime le seguenti tre equazioni scalari:

$$\begin{cases} P_{1x} + \hat{x}_{1x}V_{1x} + \hat{y}_{1x}\rho_1 c\theta_1 + \hat{z}_{1x}\rho_1 s\theta_1 = P_{2x} + \hat{x}_{2x}V_{2x} + \hat{y}_{2x}\rho_2 c\theta_2 + \hat{z}_{2x}\rho_2 s\theta_2 \\ P_{1y} + \hat{x}_{1y}V_{1y} + \hat{y}_{1y}\rho_1 c\theta_1 + \hat{z}_{1y}\rho_1 s\theta_1 = P_{2y} + \hat{x}_{2y}V_{2y} + \hat{y}_{2y}\rho_2 c\theta_2 + \hat{z}_{2y}\rho_2 s\theta_2 \\ P_{1z} + \hat{x}_{1z}V_{1z} + \hat{y}_{1z}\rho_1 c\theta_1 + \hat{z}_{1z}\rho_1 s\theta_1 = P_{2z} + \hat{x}_{2z}V_{2z} + \hat{y}_{2z}\rho_2 c\theta_2 + \hat{z}_{2z}\rho_2 s\theta_2 \end{cases} \quad (2.50)$$

Senza mostrare tutti i passaggi dalle tre equazioni precedenti si può arrivare per sostituzione ad un'unica equazione non lineare la cui unica incognita è il termine θ_2 .

$$a \sin \theta_2 + b \cos \theta_2 = c \quad (2.51)$$

I termini a , b e c sono costanti che dipendono dal tipo di sostituzione effettuata per arrivare a tale equazione. La soluzione dell'equazione non lineare può essere trovata applicando le seguenti sostituzioni:

$$t = \tan\left(\frac{\theta_2}{2}\right) \quad \sin \theta_2 = \frac{2t}{1+t^2} \quad \cos \theta_2 = \frac{1-t^2}{1+t^2} \quad (2.52)$$

Il parametro t può assumere i valori:

$$t_{1,2} = \frac{b \pm \sqrt{b^2 + a^2 - c^2}}{c + a} \quad (2.53)$$

La rotazione θ_2 vale:

$$\theta_{1,2} = 2 \arctan(t_{1,2}) \quad (2.54)$$

La scelta di una o l'altra soluzione dipende dalla scelta di montaggio. Si noti come esplicitamente gli angoli di rotazione α e β della piattaforma non sono mai entrati nelle equazioni. In realtà questi sono espressi attraverso il vettore $P1$ le cui componenti sono note a partire dalle rotazioni della piattaforma. Non essendo stati esplicitati i legami di α e β con le rotazioni dei motori θ_1 e θ_2 viene spontaneo chiedersi quali vantaggi possa offrire una soluzione così trovata. Il vantaggio della soluzione sta nella generalità con cui è stato impostato il problema. I vettori $P1$ e $P2$, che definiscono rispettivamente la posizione del vincolo che lega il link3 alla piattaforma e la posizione del vincolo che lega il link2 al motore, sono assolutamente generici. Si possono variare la posizione di questi due elementi, purchè posti sempre sul piano della piattaforma con rotazione nulla, e la soluzione cinematica non cambia. Diversamente per le matrici di posa, per come è stato impostato il problema, si avrebbe bisogno di ricalcolare da capo la soluzione. In questo caso non essendo presenti le relazioni in maniera esplicita della cinematica inversa lo Jacobiano non può essere ricavato direttamente ma potendo comunque calcolare θ_1 e θ_2 dati α e β si può ricavare lo Jacobiano inverso per via numerica sapendo che vale sempre la relazione:

$$[J]^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{d\theta_1}{d\alpha} & \frac{d\theta_1}{d\beta} \\ \frac{d\theta_2}{d\alpha} & \frac{d\theta_2}{d\beta} \end{bmatrix} \quad (2.55)$$

Capitolo 3

Ottimizzazione Cinematica

3.1 Introduzione

In questo capitolo viene affrontato il processo di ottimizzazione del *Linear Delta* attraverso l'utilizzo di un algoritmo genetico mono obiettivo in maniera da effettuare una sintesi cinematica del sistema. È stata svolta poi una sintesi cinematica relativa all'*Agile Eye*. Si vuole far osservare al lettore come la progettazione di una macchina è un procedimento ricorsivo ed il lavoro svolto in questo capitolo non è separato da quello svolto nell'analisi dinamica e nella progettazione come ricordato nelle rispettive introduzioni delle stesse. I procedimenti eseguiti sono stati effettuati attraverso l'utilizzo del software *MatLab*.

3.2 Spazio di Lavoro

Per *Spazio di Lavoro* si intende il volume all'interno del quale è in grado di lavorare un robot, o più precisamente il volume all'interno del quale il robot riesce a posizionare il proprio organo finale, *end effector*, con un certo grado di orientazione richiesta. Nell'ottica del progetto *Efesto* si hanno richieste specifiche di:

- spazio di lavoro cubico 100x100x100[mm]
- orientazione $\pm 45^\circ$, rollio e beccheggio

L'architettura cinematica scelta per il progetto è una soluzione ibrida. Questo permette di studiare separatamente i due robot, *Linear Delta* ed *Agile Eye*, i cui rispettivi spazi di lavoro devono permettere di ottenere lo spazio di lavoro richiesto per il robot completo. Ovviamente lo spazio di lavoro finale non è dato dalla combinazione degli spazi di lavoro dei due singoli robot. Siccome ad un robot sono attribuite tutte le traslazioni ed all'altro tutte le rotazioni per far raggiungere all'*end effector* una determinata posizione si ha bisogno che i movimenti dei due sistemi siano opportunamente coordinati. Sfruttando la modularità della soluzione vengono tradotte le rotazioni dell'uno negli spostamenti dell'altro in modo da poter esprimere lo spazio di lavoro del robot complessivo in uno spazio di lavoro per un unico robot, il *Linear Delta*. Lo spazio di lavoro richiesto è un cubo che poggia idealmente sopra la piattaforma che viene ruotata dall'*Agile Eye*. Essendo il centro di rotazione dell'*Agile Eye* sul piano della piattaforma si ha che i diversi punti del cubo subiranno una traslazione. Questa traslazione

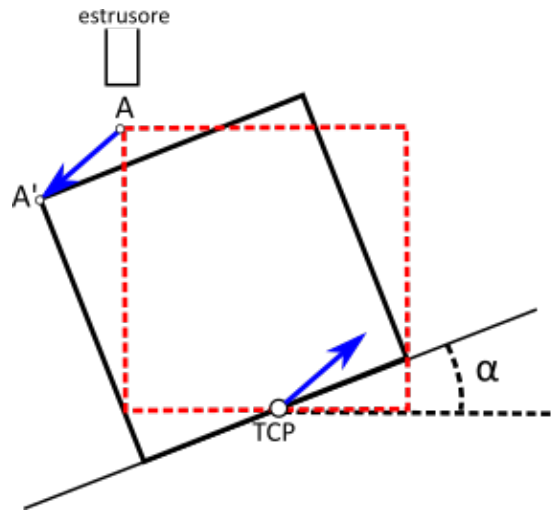


Figura 3.1: Compensazione delle traslazioni effetto delle rotazioni dell'Agile Eye

deve essere dovutamente compensata dai movimenti del *Linear Delta* il quale insieme all'Agile Eye ha il compito di posizionare tutti i punti dello spazio di lavoro al di sotto dell'estrusore della stampante in modo che questo possa depositarvi materiale. In figura 3.1 si comprende come una rotazione α della piattaforma finale attorno al TCP, per cui passa qualsiasi asse di rotazione, porta ad uno spostamento del punto A che si trova sotto l'estrusore. Se si vuole continuare a depositare materiale in quel punto si ha bisogno di compensare tale traslazione con una traslazione del TCP. Se il robot dovesse compiere solo tre traslazioni il *Linear Delta* avrebbe uno spazio di lavoro esattamente uguale al cubo richiesto. Considerando le rotazioni dell'Agile Eye si può trasformare questo cubo in uno spazio di lavoro equivalente per il *Linear Delta* all'interno del quale quest'ultimo deve muoversi garantendo il posizionamento del TCP della piattaforma rotante. I procedimenti svolti sono:

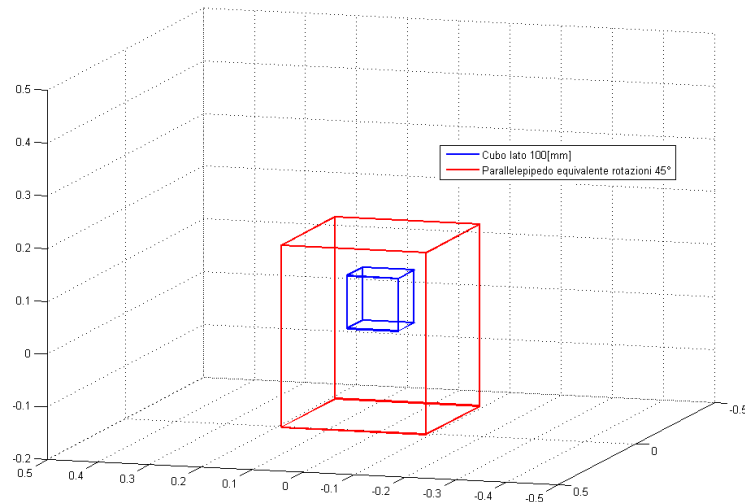
- ricavare uno spazio di lavoro equivalente
- ottimizzare il *Linear Delta*

Per ricavare lo spazio equivalente si discretizza il cubo in punti e si impone una rotazione del cubo per diversi valori di α e β . Per ogni punto ed ogni rotazione viene misurato lo spostamento del TCP che garantisce di portare il punto considerato di volta in volta al di sotto dell'estrusore. Alla fine del processo considerando gli spostamenti massimi del TCP nelle diverse direzioni, x , y e z , si ricava lo spazio equivalente cercato. Considerando dei punti sulla superficie esterna del cubo, i vertici ed i punti a metà tra un vertice e l'altro, si sono ricavati i valori in tabella 3.1. Dalla tabella si nota come gli spazi ricavati non sono dei cubi ma dei parallelepipedi, ogni valore indica la lunghezza del relativo lato. Sono state considerate rotazioni di rollio e beccheggio fino a 90° . Da progetto i valori di interesse sono quelli relativi alla riga dei 45° ma è comunque interessante vedere come variano questi valori per angoli diversi.

Data la natura del *Linear Delta*, per cui la traslazione lungo z può essere di qualsiasi entità purchè gli slider che realizzano i vincoli prismatici abbiano una corsa sufficiente, il problema tridimensionale può essere tradotto in un problema piano. Il *Linear Delta* deve essere in grado di coprire un rettangolo di lati 210.8 e 227.2[mm]. La soluzione

Tabella 3.1: Spazi di lavoro equivalenti

	$x[mm]$	$y[mm]$	$z[mm]$
30°	186.6	198.4	169.1
45°	210.8	227.2	182.1
60°	223.2	243.6	187.4
90°	223.6	245	187.4

**Figura 3.2:** Nuovo spazio di lavoro

modulare scelta fa sì che il robot possa facilmente essere tradotto da un tre gradi di libertà ad uno a cinque e viceversa attraverso il montaggio e smontaggio dell'*Agile Eye*. Nell'ipotesi del solo tre gradi si è deciso di avere uno spazio di lavoro quadrato per il *Linear Delta*. Prendendo allora come riferimento il lato più lungo il *Linear Delta* deve avere:

- Spazio di lavoro quadrato di lato 230[mm]

In figura 3.2 si vede la trasformazione dello spazio di lavoro cubico in uno in forma di parallelepipedo.

3.3 Ottimizzazione del Linear Delta

3.3.1 Scelta dei parametri

Per ottimizzazione del *Linear Delta* si intende il calcolo di determinati parametri del robot in funzione di specifici obiettivi da raggiungere. In questo caso l'unico obiettivo che ci si prefigge è la copertura dello spazio di lavoro desiderato che come mostrato è stato possibile tradurre in un quadrato di lato 230[mm]. Bisogna allora definire quali siano quei parametri che influiscono maggiormente sull'obiettivo; si tratta di parametri che definiscono la geometria del robot e la cui variazione incide sulla mobilità del robot nello spazio. Vengono scelti 4 parametri ritenuti fondamentali:

- l lunghezza dei link

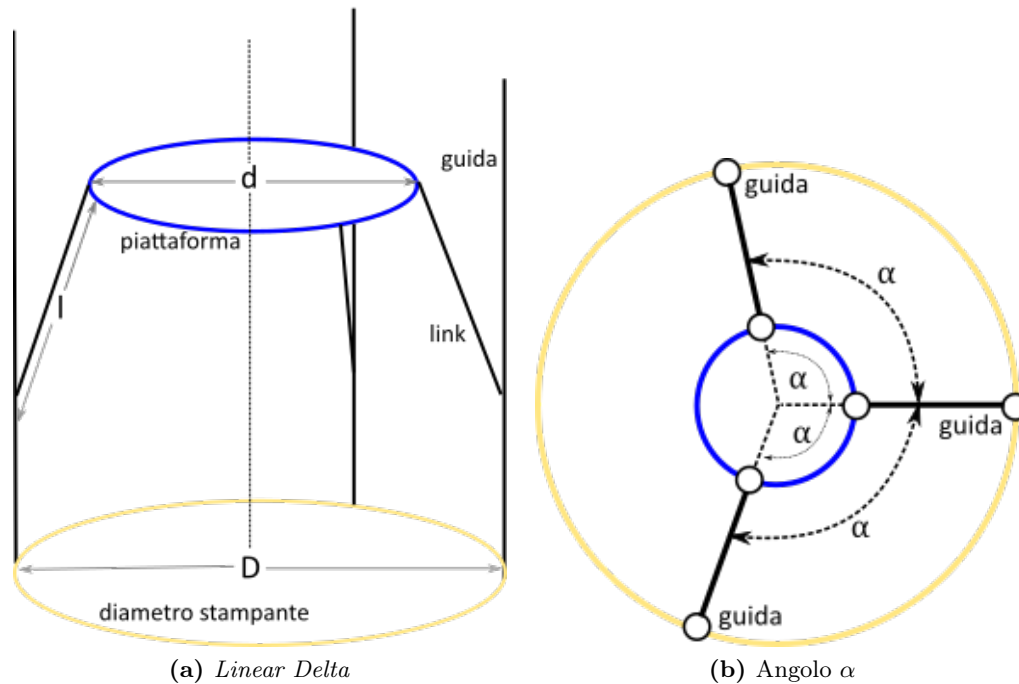


Figura 3.3: Parametri dell'ottimizzazione

- d diametro della piattaforma
- D diametro della stampante
- α posizione relativa delle guide

Per comprendere bene il significato di tali parametri si faccia riferimento alla figura 3.3. I parametri l e d definiscono la grandezza degli elementi fondamentali del robot mentre il cerchio di diametro D dà l'ingombro della stampante essendo le guide posizionate su di esso. Posizionata una guida l'angolo α definisce la posizione delle altre due. La scelta di tali parametri determina completamente la struttura del *Linear Delta*. Bisogna dire come tale scelta è arbitraria e niente vieta di prendere parametri diversi o concedere a quelli scelti una maggiore libertà; questi parametri sono stati selezionati in accordo con le considerazioni fatte in fase di scelta dell'architettura cinematica. Avere i link di uguale lunghezza e guide disposte sul diametro di uno stesso cerchio secondo l'angolo α permette di garantire almeno un piano di simmetria per la macchina. Concedere una variazione diversa ai parametri scelti avrebbe modificato alcune delle caratteristiche per cui il *Linear Delta* è stato scelto.

3.3.2 Algoritmo genetico

L'algoritmo genetico è il metodo attraverso il quale viene svolto lo studio di ottimizzazione per i 4 parametri del *Linear Delta*. Gli algoritmi genetici possono essere in generale divisi tra quelli a singolo obiettivo e quelli multi obiettivo. Il compito dell'algoritmo è quello di trovare la migliore combinazione dei parametri in modo da massimizzare o minimizzare una determinata funzione obiettivo. In questo studio si usa un algoritmo

genetico a singolo obiettivo attraverso l'utilizzo della funzione *ga* di MatLab. Vengono effettuati due tipi di studi, uno adimensionale e uno dimensionale. Il primo per ottenere una comprensione di come i parametri scelti influiscono sullo spazio di lavoro della macchina e di come l'algoritmo genetico vari il risultato al variare dei vincoli imposti, ed il secondo per ottenere i valori finali dei parametri. Nel primo sono resi adimensionali i parametri di lunghezza dividendoli per il diametro D e attraverso l'uso dell'algoritmo si cerca di trovare la migliore soluzione in modo da massimizzare lo spazio di lavoro del *Linear Delta*. Nel secondo caso i parametri sono lasciati dimensionali e ci si prepone di ottimizzare la struttura in modo da coprire al meglio lo spazio di lavoro richiesto.

Un algoritmo genetico a singolo obiettivo come quello della funzione *ga* lavora nel seguente modo:

1. Creazione di una prima popolazione di individui dal numero imposto. Ogni individuo non è altro che un set specifico dei parametri su cui si basa l'ottimizzazione. I valori di questi parametri per ogni individuo vengono definiti *geni*;
2. Per ogni individuo viene valutata una funzione di costo che esprime l'obiettivo che si vuole raggiungere. In questo modo è possibile stilare una classifica tra i vari individui. In linea generale si può cercare sia il massimo che il minimo di una funzione di costo per ottimizzare l'obiettivo, di solito si tende a fare in modo che il minimo della funzione corrisponda all'ottimo da trovare;
3. In base alla classifica stilata si sceglie un numero imposto di individui migliori che costituiscono l'*elitè* della generazione e che passano immutati alla generazione successiva;
4. Si crea una nuova generazione secondo due modalità. Si creano nuovi individui per combinazione casuale dei geni degli individui elitari della generazione precedente, *crossover*. Si creano nuovi individui attraverso la mutazione dei geni di un singolo individuo elitario, *mutation*. La frazione di individui derivante da *elitè*, *crossover* e *mutation* è scelta dall'utente;
5. Si riparte dal punto 2 generando nuove popolazioni. L'algoritmo si ferma quando si verifica una condizione di stop. Esistono diversi tipi di queste condizioni. Se si crea una situazione di stallo, cioè la variazione mediata e opportunamente pesata del miglior valore della funzione di costo tra le varie generazioni è inferiore ad una tolleranza prefissata, oppure si possono mettere dei limiti sul numero massimo di popolazioni create o sul tempo che deve durare l'algoritmo, oppure stop manuale nel caso si ritenga di aver raggiunto un risultato soddisfacente.

Negli studi effettuati vengono create popolazioni costituite da 300 individui e si impone una condizione di stop basata su una condizione di stallo per 50 generazioni consecutive.

3.3.3 Funzione di costo

L'algoritmo genetico si basa sulla valutazione di una funzione di costo. Sia nel caso dell'ottimizzazione adimensionale che nel caso della dell'ottimizzazione dimensionale questa funzione corrisponde al calcolo di un'area non coperta, questo perchè la mobilità lungo l'asse z del robot permette di rendere il problema piano. Nell'adimensionale

quest'area corrisponde alla differenza tra l'area massima che potrebbe coprire il robot rispetto all'area data dal suo spazio di lavoro effettivo. L'area massima corrisponde all'area definita dal cerchio di diametro D ; il robot in realtà potrebbe uscire da tale area ma il raggiungimento di tali posizioni non è di alcun interesse pratico e perciò vengono escluse.

$$f_{ad} = \frac{\pi D^2}{4} - W_{ld} \quad (3.1)$$

La funzione di costo adimensionale è f_{ad} mentre W_{ld} è lo spazio di lavoro, *WorkSpace*, del *Linear Delta*. Nello studio dimensionale la funzione di costo è data dalla differenza tra lo spazio di lavoro obbiettivo e l'intersezione tra lo spazio di lavoro del *Linear Delta* con lo spazio di lavoro da coprire, questo perchè potrebbe accadere che l'area dello spazio calcolato sia grande a sufficienza ma non della forma necessaria, in questo caso quadrata.

$$f_d = W_d - (W_d \cap W_{ld}) \quad (3.2)$$

La funzione di costo dimensionale è f_d e W_d è lo spazio di lavoro obbiettivo. La funzione 3.4a garantisce che il minimo assoluto sia il valore nullo, valore verso il quale tenderà a convergere l'algoritmo genetico. Stessa considerazione vale per la funzione 3.4b dove l'intersezione può assumere come valore massimo W_d annullando la funzione stessa.

Indipendentemente dal tipo di studio effettuato, adimensionale o dimensionale, il calcolo dello spazio di lavoro del *Linear Delta* avviene sempre nella stessa maniera:

1. Definiti i 4 parametri del robot ne è definita tutta la struttura. Il robot viene posto in posizione centrale, posizione per la quale il centro della piattaforma e il centro del cerchio della stampante sono allineati lungo una retta verticale, figura 3.3a;
2. Il robot viene mosso in direzione di una guida in maniera discreta spostando la posizione del TCP e di volta in volta si verifica la fattibilità della soluzione nel rispetto della cinematica inversa e di altri specifici vincoli che verranno nel seguito descritti, figura 3.4a;
3. raggiunta una posizione per la quale o la cinematica o i vincoli non sono rispettati il processo viene arrestato avendo raggiunto il bordo dello spazio di lavoro;
4. la piattaforma viene spostata in senso antiorario a partire dal punto precedente di una quantità prefissata e viene ricercato il nuovo limite dello spazio di lavoro spostandosi lungo la direttrice definita dal centro della macchina, dato dalla posizione iniziale del robot, e il centro momentaneo della piattaforma, figura 3.4b;
5. terminata la rotazione di 360° viene ricavata l'area dello spazio di lavoro attraverso l'utilizzo della funzione *polyarea*.

3.3.4 Vincoli

Nel calcolo della funzione di costo e quindi dell'area di lavoro del *Linear Delta* si vuole e si devono rispettare dei vincoli che garantiscono sia la fattibilità della soluzione trovata che la buona qualità della stessa in termini di prestazioni del robot. Questi vincoli sono:

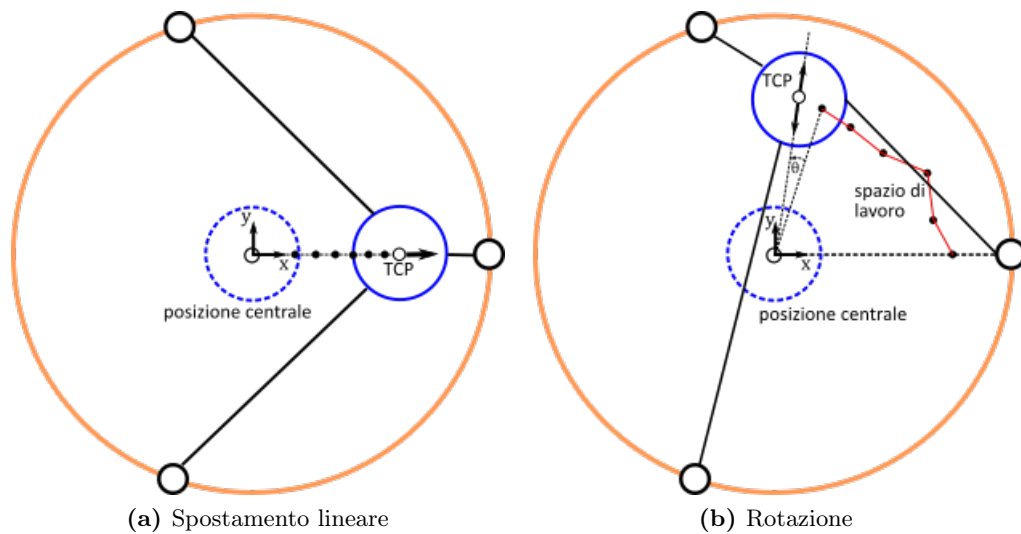


Figura 3.4: Calcolo dello spazio di lavoro del *Linear Delta*

Cinematica La soluzione deve garantire il rispetto della cinematica come calcolata dall'equazione 2.4.

Giunti Universali Nella realtà costruttiva i giunti che collegano i link alla piattaforma e alle guide hanno dei limiti pratici di rotazione ammissibile che vanno rispettati.

Moltiplica Forze e velocità Il *Linear Delta* deve garantire una certa possibilità di carico e di velocità di movimentazione senza aver bisogno di attuatori e parti di dimensioni eccessive.

Singularità Bisogna evitare che il robot si venga a trovare in posizioni singolari.

Essendo la condizione di rispetto cinematica già stata affrontata nel capitolo 2 ci si concentrerà sugli altri tre vincoli.

Come già accennato nella pratica il *Linear Delta* non presenta delle catene cinematiche del tipo PUS ma delle catene PUU, Prismatic-Universal-Universal. I giunti universali sono vincoli in grado di concedere due rotazioni relative tra le parti collegate. Queste due rotazioni hanno dei limiti realizzativi che sono diversi per le due rotazioni. In figura 3.5 sono rappresentate schematicamente le rotazioni relative concesse, α_1 e α_2 . La rotazione α_1 indica l'angolo compreso tra il link ed un'asse orizzontale appartenenti allo stesso piano verticale. La rotazione α_2 indica l'angolo compreso tra il link ed un'asse orizzontale definito dalla linea congiungente la guida a cui appartiene il link ed il centro della macchina. Le rotazioni concesse tra link e guida e link e piattaforma sono identiche ed assumono in ogni posa gli stessi valori, se si arriva ad eccedere il vincolo dato dal giunto da un lato del link lo si supera anche sull'altro lato. I limiti dati a queste rotazioni sono fondamentali per la mobilità del robot. Maggiori sono questi valori maggiore è lo spazio che può coprire il *Linear Delta*. Il giunto di per sé non ha limitazioni nella rotazione α_1 ma a questo vincolo viene imposto un valore massimo di 90° introdotto per escludere la possibilità che la piattaforma vada a scontrarsi con una guida. Per α_2 si impone un valore di 60° nell'ottimizzazione dimensionale mentre è reso variabile nell'ottimizzazione adimensionale. Nella funzione utilizzata il calcolo di tali rotazioni è stato effettuato grazie ad una terna solidale alla guida, e quindi fissa,

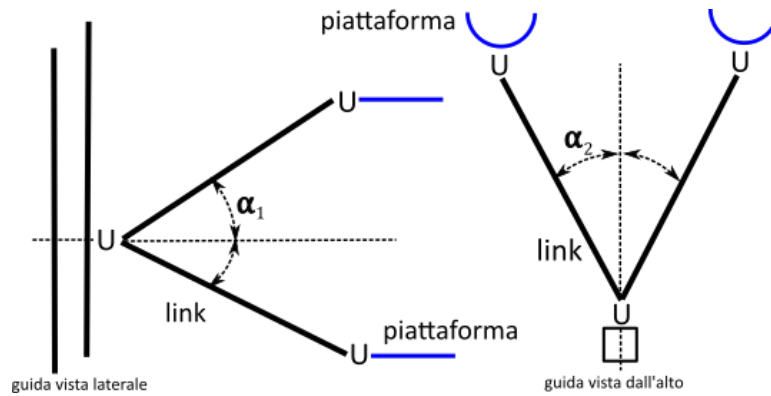


Figura 3.5: Rotazioni dei giunti universali

ed un versore solidale al link. Durante il calcolo della funzione di costo ogni posizione della piattaforma che portava ad eccedere questi limiti viene automaticamente esclusa essendo non fattibile.

Nella sintesi di un robot si vuole non solo verificare la fattibilità del moto nello spazio di lavoro ma in generale si richiede che in tutto lo spazio di lavoro siano rispettate certe specifiche che garantiscano una certa qualità di prestazione del robot stesso. La scelta di questi parametri può essere varia ma ce ne sono alcuni maggiormente utilizzati in quest'ambito e di cui si hanno esempi di utilizzo anche sul *Linear Delta* [31]. Alcuni di questi parametri sono:

- Indice di manipolabilità $\sqrt{\det(J^{-T}J^{-1})}$, indicatore dell'abilità dell'*end effector* di muoversi in tutte le direzioni in una data posa del robot;
- Numero di condizionamento $\frac{\sigma_{max}(J^{-1})}{\sigma_{min}(J^{-1})}$, può assumere valori da 1 ad ∞ ed è un indicatore dell'isotropia cinematica del robot. Definito dal rapporto tra i valori singolari massimo e minimo dello Jacobiano. Valori unitari di quest'indice indicano perfetta isotropia
- matrice di rigidità $(JJ^T)^{-1}$, gli autovalori di tale matrice sono un indice della rigidità del sistema avendo considerato come componenti elastici gli attuatori e come corpi rigidi tutti gli altri

Si può notare come questi indici dipendano tutti dallo Jacobiano del sistema e che quindi risulta essere di fondamentale importanza per definire le prestazioni del *Linear Delta*. Al fine di ottenere determinate prestazioni del *Linear Delta* si è preferito utilizzare altri due parametri, dipendenti sempre dallo Jacobiano, che tengono conto in maniera diretta di ciò che più interessa ai fini del progetto. Questi due parametri sono la moltiplica delle forze, τ_f , e la moltiplica delle velocità, τ_v .

$$\tau_f = \|J^T\|_\infty \qquad \tau_v = \|J^{-1}\|_\infty \qquad (3.3)$$

Questi due parametri vengono calcolati attraverso la norma infinito della matrice Jacobiana trasposta ed inversa. Queste espressioni derivano dal considerare forze e velocità al massimo unitarie sul TCP e attraverso lo Jacobiano si possono calcolare le forze e velocità sugli attuatori. Ponendo un limite a questi valori, che in questo

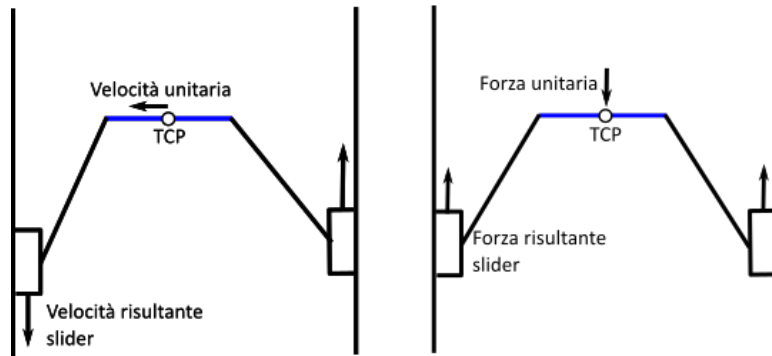


Figura 3.6: Moltiplica delle velocità e forze

caso è stato posto pari a 3, sia per τ_f che per τ_v , si pongono questi parametri di prestazione del robot come vincoli da rispettare. Se queste moltipliche superano i valori stabiliti la posizione della piattaforma assunta viene esclusa e considerata come non fattibile. Si noti che le τ nelle equazioni 3.3 sono degli scalari, nel caso del *Linear Delta* corrispondono alla moltiplica massima per uno dei tre attuatori. Basta che uno solo degli attuatori ecceda il valore limite per rendere la posizione del robot infattibile. La scelta della norma infinito per calcolare le moltipliche è arbitraria, si potevano utilizzare anche altre norme come quella euclidea. La norma infinito è quella che garantisce di considerare il caso peggiore in cui sono contemporaneamente unitarie tutte le forze e le velocità sul TCP cosa non possibile con la norma euclidea. In figura 3.6 si mostra un esempio di relazione tra la velocità della piattaforma e forza applicata sulla piattaforma e la risultante sugli attuatori. Avere moltipliche di velocità e forza basse garantisce di poter avere attuatori più piccoli a parità di carichi.

L'ultimo vincolo è quello sulle singolarità del robot. Un robot si definisce in posizione singolare quando si trova in quelle configurazioni per cui si ha l'azzeramento del determinante dello Jacobiano o del suo inverso.

$$\det([J]) = 0 \Leftrightarrow \det([J^{-1}]) = \infty \quad (3.4)$$

$$\det([J]^{-1}) = 0 \Leftrightarrow \det([J]) = \infty \quad (3.5)$$

A livello pratico questo consiste nel fatto che il robot può venire a trovarsi in configurazioni per le quali si hanno rigidità infinite o nulle lungo determinate direzioni. Questo corrisponde a trovarsi in configurazioni per le quali o si perde il controllo del robot, situazione di labilità, oppure si arriva ad impuntarsi perdendo possibilità di moto. Nel caso del *Linear Delta* riconosciamo facilmente due configurazioni singolari come mostrato in figura 3.7. Nella figura di sinistra vediamo come una configurazione singolare consiste nell'avere un link completamente orizzontale. In questa posizione si ha rigidità infinita lungo l'asse del link in quanto qualsiasi carico si va a scaricare sulla guida, vincolo ideale, e allo stesso tempo diviene immediato notare la labilità della struttura. Ad un movimento dello slider non corrisponde più un movimento della piattaforma, il link orizzontale può ruotare attorno al punto fisso A senza che la piattaforma si sposti. Nella figura di destra vediamo un'altra situazione critica in cui si rischia il bloccaggio del sistema. Il link ora è in posizione completamente verticale, in questa configurazione lo slider collegato non può più essere mosso per controllare il robot ma deve essere trascinato via da questa configurazione. Nello studio del robot e nella sua sintesi non solo

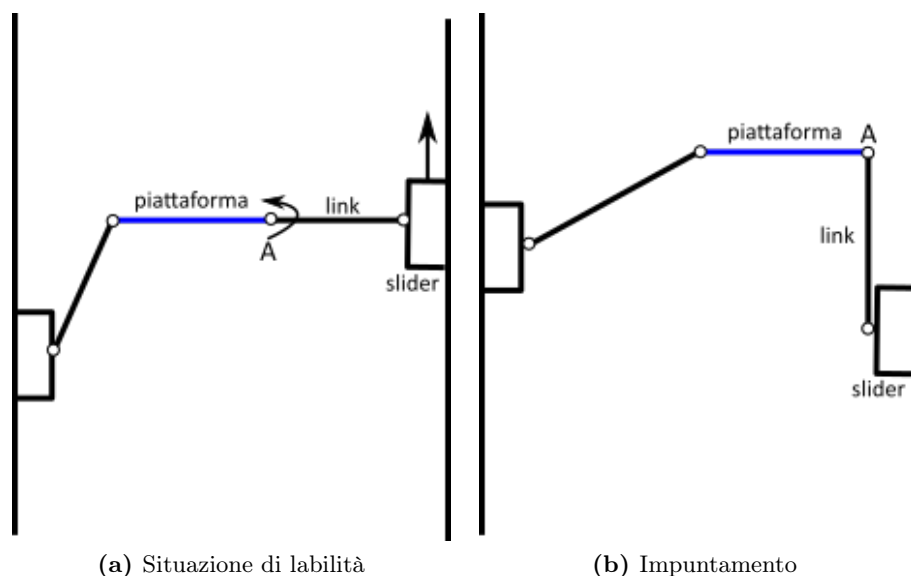


Figura 3.7: Singolarità del *Linear Delta*

si vogliono evitare tali configurazioni critiche ma ce ne si vuole tenere a debita distanza. Nella fase di ottimizzazione tutto questo viene fatto sempre attraverso le moltipliche di forze e velocità precedentemente descritte. Questi due fattori direttamente collegati allo Jacobiano garantiscono in maniera indiretta la lontananza da certe posizioni. Nella configurazioni singolari, per cui si ha perdita di mobilità o rischio di impuntamento, i valori di τ_f e τ_v tendono ad aumentare oltre i valori desiderati. Si ricorda come valga la dualità cinetostatica per cui se si riescono a trasmettere grandi forze non si riescono a trasmettere elevate velocità e viceversa. Tenendo in considerazione tutte e due i parametri contemporaneamente si vuole evitare l'avvicinamento a tali posizioni.

L'aver introdotto la moltiplica delle forze e delle velocità come vincoli e non come obiettivi da raggiungere ha permesso l'utilizzo di un algoritmo genetico a singolo obiettivo invece che di uno multi obiettivo. Questo rende più facile l'avvicinarsi alla soluzione ottima che diventa unica mentre nell'analisi multi obiettivo è da ricercare in una famiglia di soluzioni.

3.3.5 Ottimizzazione adimensionale

Nell'ottimizzazione adimensionale si vuole comprendere come i parametri scelti per definire la geometria del robot influiscono sulla copertura dello spazio di lavoro e come la variazione dei vincoli imposti influisca sul risultato dell'algoritmo genetico. Un'ottimizzazione puramente dimensionale rischia di portare ad ottenere un robot di grandi dimensioni; nel momento in cui si impone all'algoritmo di coprire una certa area l'algoritmo potrebbe semplicemente ingrandire la macchina fino a coprire lo spazio di lavoro richiesto, inoltre è possibile che esistano più soluzioni che soddisfino i vincoli imposti all'algoritmo. Una comprensione del comportamento adimensionale della struttura e dei suoi parametri permette di poter meglio definire i limiti all'interno dei quali far lavorare l'algoritmo in fase di ottimizzazione dimensionale, e di poter meglio scegliere fra le soluzioni trovate.

Tabella 3.2: Range dei parametri dello studio adimensionale

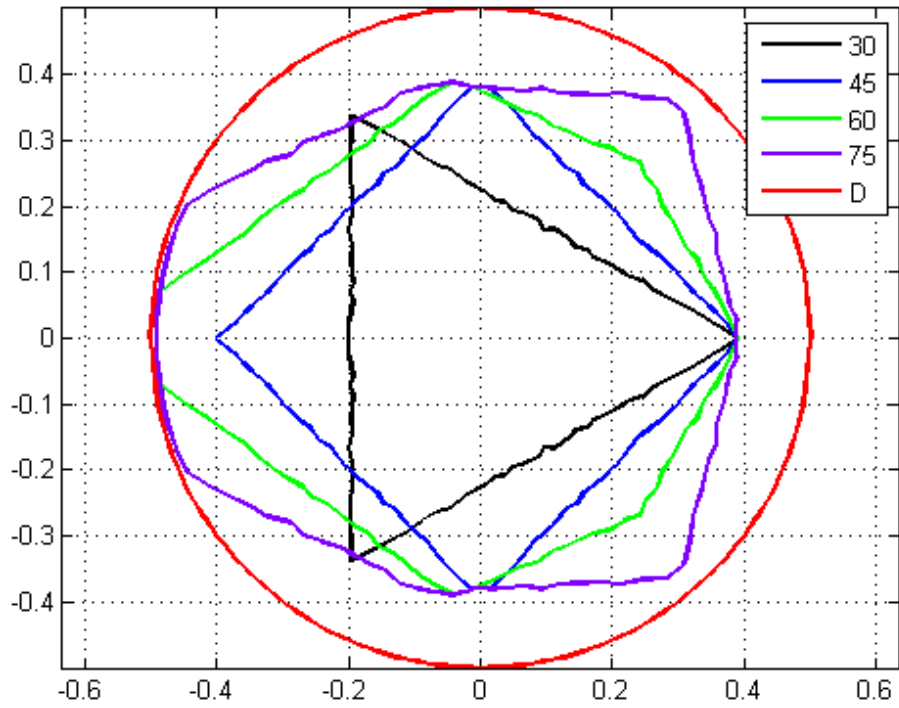
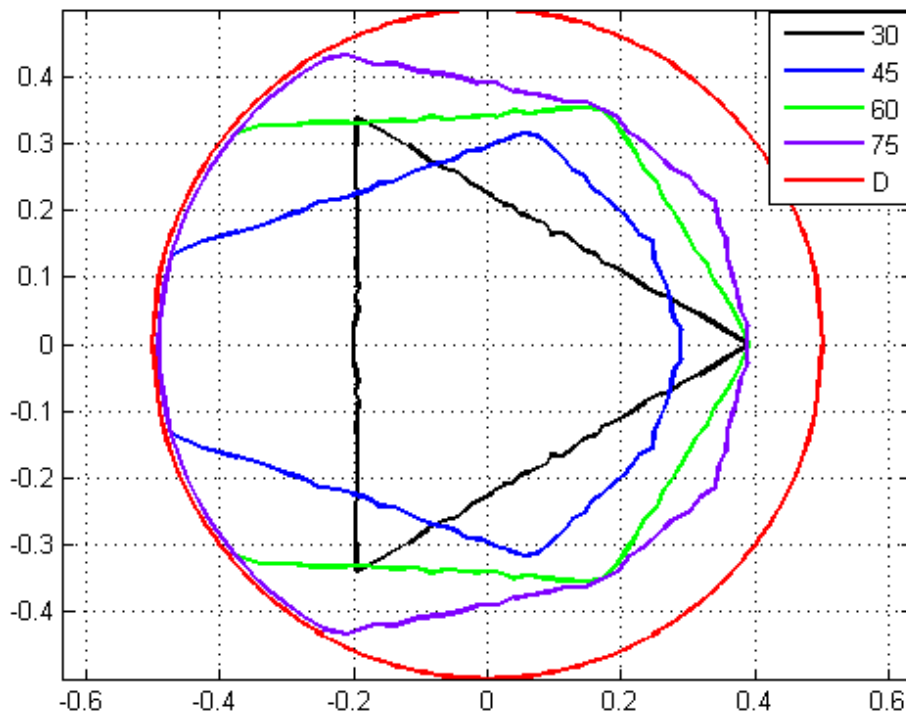
Parametro	Range
d	0.2 – 1
l	0.4 – 2
α	10° – 170°

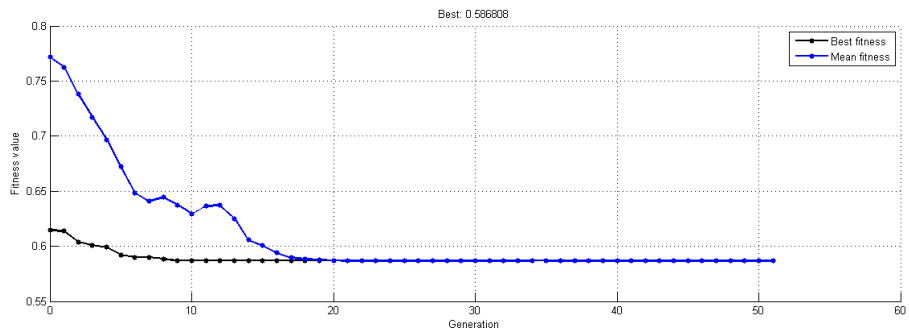
Per effettuare lo studio adimensionale ognuno dei tre parametri di lunghezza D , d ed l è stato espresso in funzione di D facendo in modo che il diametro della struttura rimanga sempre unitario mentre i valori delle altre due lunghezze varino tra due valori limite di minimo e massimo che esprimono il rapporto di tali lunghezze con il diametro D . L'angolo α essendo per definizione adimensionale è stato lasciato tale. In tabella 3.2 vediamo i range all'interno dei quali sono fatti variare i tre parametri.

La scelta di tali range è dettata da alcune considerazioni pratiche. La piattaforma interna al sistema può assumere al massimo un diametro d pari ad 1, questo vuol dire che al massimo assume la stessa dimensione della stampante stessa; è ovvio come già questo valore sia impensabile da raggiungere in pratica perchè ad una piattaforma di tali dimensioni verrebbe precluso qualsiasi tipo di movimento ed è per questo che tale valore è stato posto come limite superiore. Il limite inferiore è dato dal fatto che la piattaforma deve avere delle dimensioni minime per poter ospitare la struttura dell'*Agile Eye*; inoltre tale limite è stato scelto assieme al limite inferiore di lunghezza dei link in modo tale che la lunghezza di link e piattaforma rendesse almeno possibile montare in posizione centrale la struttura. Per quanto riguarda il limite superiore dei link anche in questo caso è stato scelto un valore di per se elevato, i link possono assumere in questo studio una lunghezza fino a due volte quella del diametro della stampante. La posizione delle guide, definita sul cerchio di diametro D dall'angolo α , viene lasciata libera di variare su quasi tutto lo spazio disponibile, sono lasciati dei margini considerando che le guide hanno una dimensione fisica e non possono essere troppo vicine.

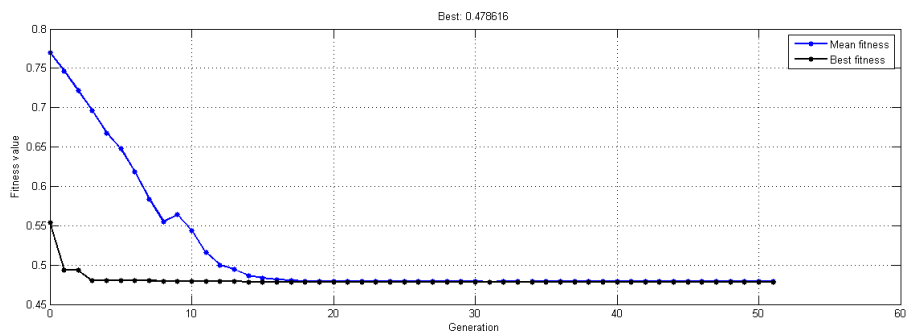
Lo studio adimensionale è conseguito attraverso l'uso dell'algoritmo genetico della funzione ga di MatLab. A questa funzione vengono dati i limiti superiori(up-upper bound) ed inferiori(lb-lower bound) dei parametri e la funzione di costo $f_a d$, eq.3.1, da minimizzare. Il risultato prodotto dall'algoritmo genetico dipende dai vincoli imposti ed è per questo che si svolge una campagna di prove variando i tre vincoli, α_2 , τ_f e τ_v . Questi sono gli unici vincoli soggetti a variabilità. Non si possono eliminare i vincoli cinematici ed il vincolo α_1 è al massimo valore possibile. La differenza tra i tre vincoli è che i fattori di moltiplica rispecchiano la volontà di raggiungere determinate prestazioni della macchina, invece il vincolo α_2 è un vincolo progettuale che dipende dalla realizzazione in fase costruttiva dei giunti universali. Durante le prove effettuate α_2 è stato fatto variare da 30° a 75° con passo di 15°, mentre alle τ vine fatto assumere il valore 3 o 5.

In tabella 3.3 sono mostrati i risultati dell'ottimizzazione adimensionale. Nella prima parte della tabella sono mostrati i risultati e la media di alcune prove effettuate con diversi valori di α_2 e $\tau_{f,max}$ e $\tau_{v,max}$ uguali a 3. Nella parte bassa della tabella si mostrano i risultati per una moltiplica delle forze e velocità pari a 5. L'indicatore cp è un indice di copertura che mostra la percentuale di area coperta dallo spazio di lavoro del *Linear Delta* rispetto all'area totale disponibile, cioè l'area definita dal cerchio di diametro D . Va sottolineato come quest'indice non potrà mai raggiungere il 100% in

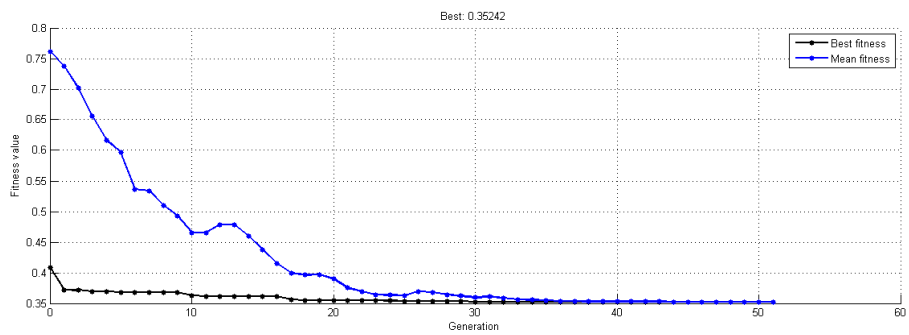
(a) Spazi di lavoro al variare di α_2 , $\tau_{f,max} = \tau_{v,max} = 3$ (b) Spazi di lavoro al variare di α_2 , $\tau_{f,max} = \tau_{v,max} = 5$ **Figura 3.8:** Spazi di lavoro al variare di α_2 e τ



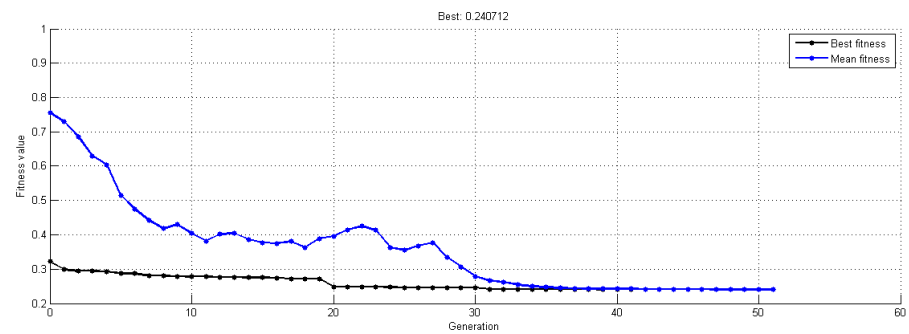
(a) Ottimizzazione adimensionale $\alpha_2 = 30$



(b) Ottimizzazione adimensionale $\alpha_2 = 45$

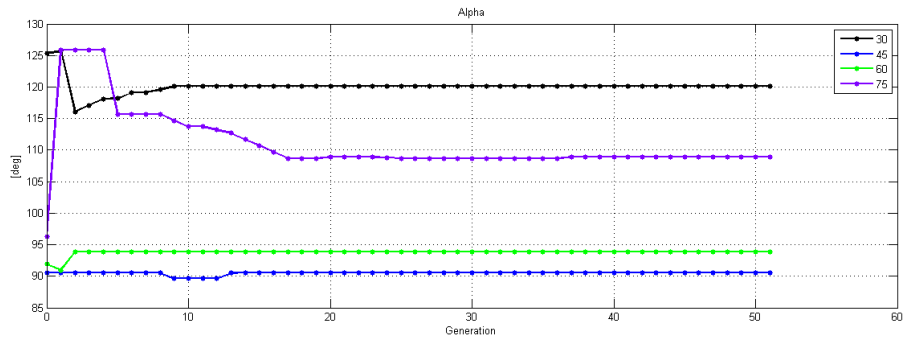
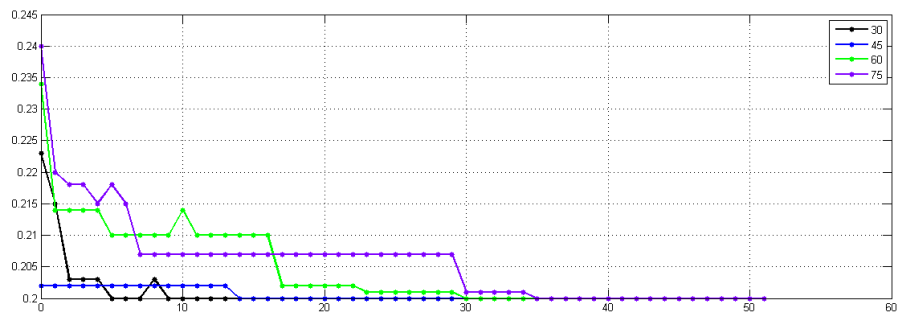
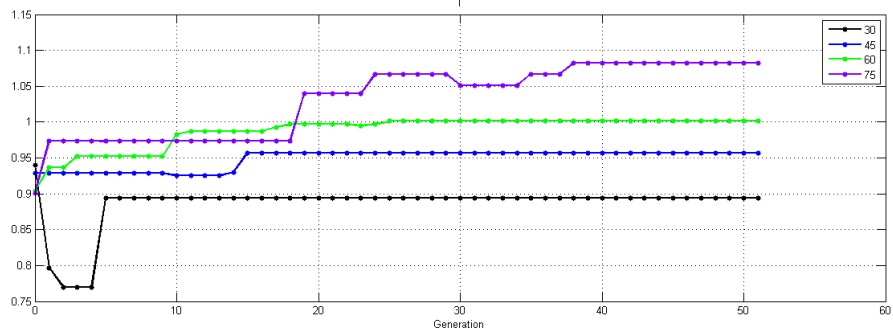


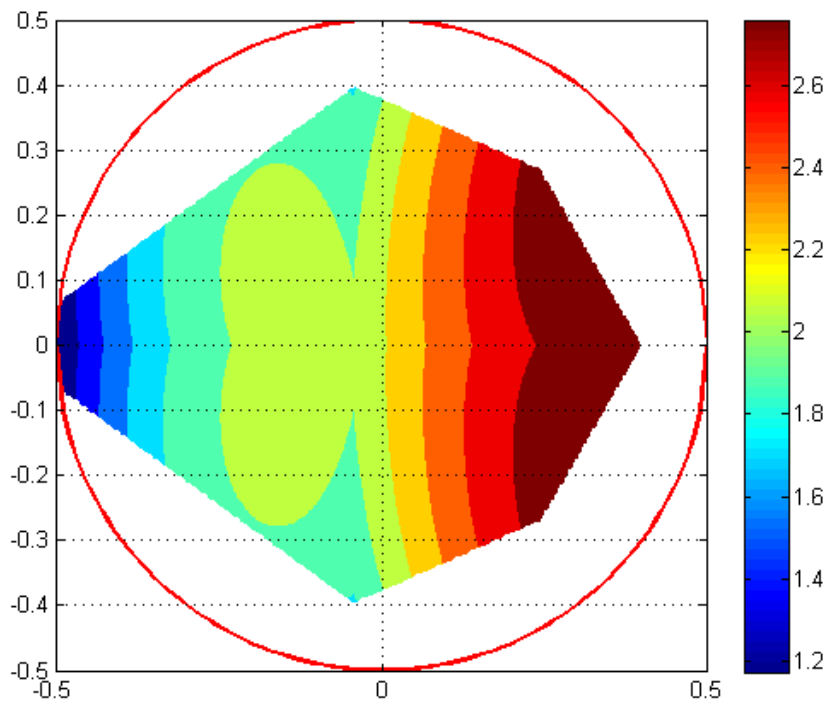
(c) Ottimizzazione adimensionale $\alpha_2 = 60$



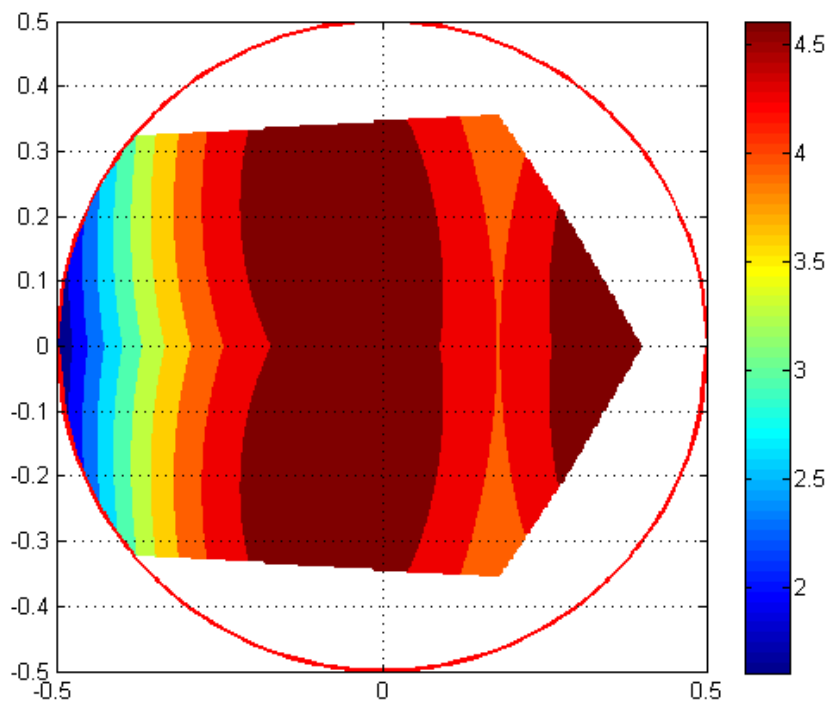
(d) Ottimizzazione adimensionale $\alpha_2 = 75$

Figura 3.9: Convergenza dell'algoritmo genetico per diversi valori di α_2 e $\tau_{f,max} = \tau_{v,max} = 3$

(a) Convergenza α (b) Convergenza d (c) Convergenza l **Figura 3.10:** Ottimizzazione adimensionale dei parametri α , d ed l al variare di α_2

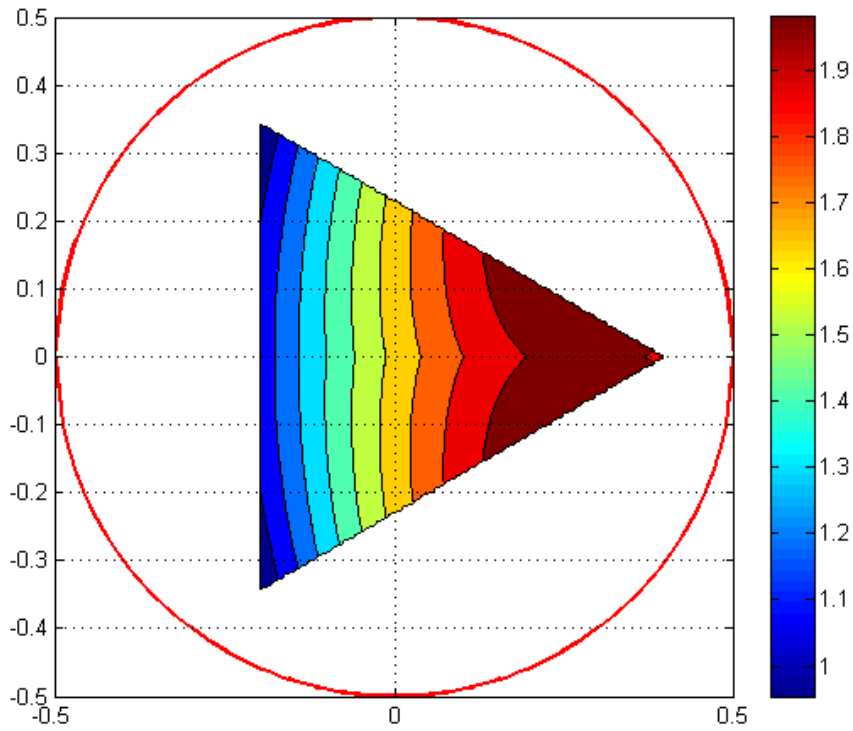


(a) $\tau_{f,max} = 3, \alpha = 96.11$

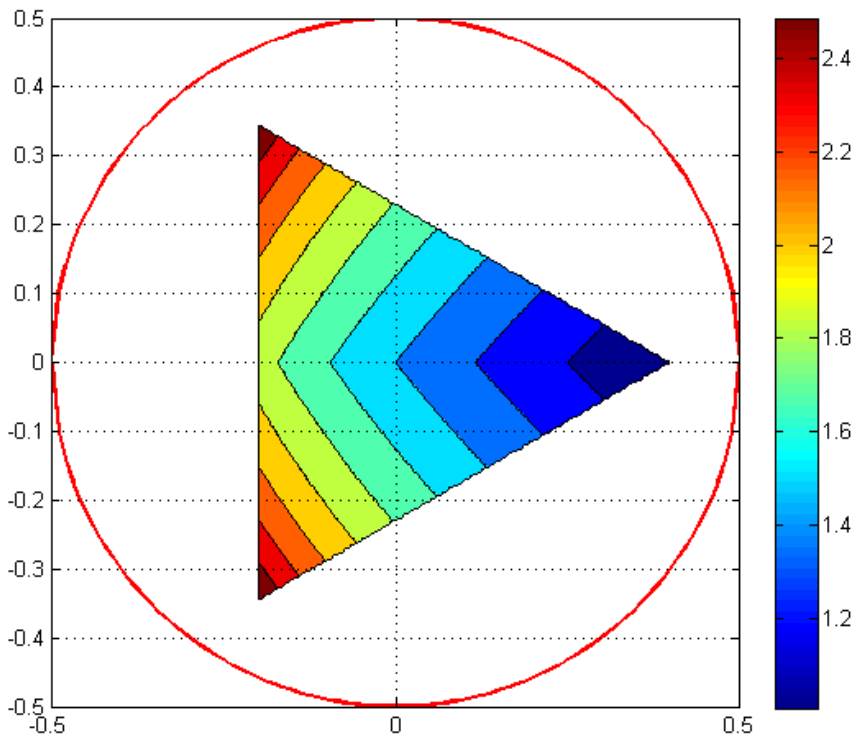


(b) $\tau_{f,max} = 5, \alpha = 63.45$

Figura 3.11: Moltiplica delle forze con $\alpha_2 = 60^\circ$



(a) Moltiplica delle forze



(b) Moltiplica delle velocità

Figura 3.12: Moltiplica delle forze e delle velocità con $\alpha_2 = 30$, $\tau_{f,max} = \tau_{v,max} = 3$

Tabella 3.3: Risultati dell'ottimizzazione adimensionale

	1	2	3	media	cp	
l	0.893	0.894	0.9	0.896		$\tau_{f,max} = \tau_{v,max} = 3$
d	0.2	0.2	0.2	0.2	25.3%	
α	120.14	120.18	119.91	120.08		$\alpha_2 = 30^\circ$
l	0.928	0.925	0.957	0.937		$\tau_{f,max} = \tau_{v,max} = 3$
d	0.2	0.2	0.2	0.2	39.3%	
α	88.24	90.13	90.57	89.65		$\alpha_2 = 45^\circ$
l	1.013	1.024	1.007	1.015		$\tau_{f,max} = \tau_{v,max} = 3$
d	0.2	0.2	0.204	0.2	54.8%	
α	95.34	97.02	95.96	96.11		$\alpha_2 = 60^\circ$
l	1.08	1.02	1.02	1.04		$\tau_{f,max} = \tau_{v,max} = 3$
d	0.2	0.2	0.2	0.2	69.5%	
α	108.93	95.59	100.0	101.51		$\alpha_2 = 75^\circ$
α_2	30°	45°	60°	75°		
l	0.906	0.984	0.967	0.991		
d	0.2	0.2	0.2	0.2		
α	119.37	63.8	63.45	64.34		$\tau_{f,max} = \tau_{v,max} = 5$
cp	25.2%	42.9%	63.6%	74.5%		

quanto l'area di lavoro calcolata fa riferimento al TCP, centro della piattaforma; la piattaforma non può avvicinarsi troppo alle guide e quindi l'area coperta dal centro non potrà mai uguagliare l'area totale. Questo ovviamente non cambia il fatto che il *Linear Delta* con il cp più elevato è anche quello con lo spazio di lavoro maggiore.

Dai dati in tabella si può notare sicuramente un risultato concorde per tutte le prove. Il diametro d converge sempre verso il valore 0.2. Questo è un risultato che ci si poteva attendere. Per coprire la quantità di area maggiore con il TCP bisogna avere una piattaforma la più piccola possibile in modo da garantirne la massima mobilità all'interno della stampante. I valori di l hanno invece una certa variabilità, rimanendo comunque compresi tra circa 0.9 e 1.1. I link devono avere una lunghezza all'incirca della stessa dimensione di D . Ancora maggiore variabilità si ha per l'angolo α , molto più sensibile degli altri due parametri al variare dei vincoli imposti, soprattutto al variare dei fattori limite di moltiplica. Per valori di α_2 pari a 45° , 60° e 75° si ha un forte cambiamento dei valori di α passando da un limite di moltiplica di 3 ad uno di 5. L'angolo α passa da valori compresi tra 90° e 100° a valori tutti nell'intorno di 63° . Questo cambiamento drastico di posizione è dovuto principalmente al fatto che avere guide più vicine in posizione, e quindi bassi valori di α permette alla macchina di coprire meglio lo spazio richiesto. Questo però comporta un peggioramento della moltiplica delle forze e quindi tale soluzione diventa fattibile solo quando si aumenta tale limite. In figura 3.11 si vede il peggioramento nei fattori di moltiplica per $\alpha_2 = 60^\circ$ per uno dei 3 slider.

In figura 3.8 si vede bene come variano gli spazi di lavoro della macchina al variare dei vincoli. L'aumento di α_2 come quello delle τ porta ad un aumento dello spazio di lavoro finale, ovvia conseguenza di una maggiore mobilità della macchina e una maggiore

possibilità di sopportare carichi elevati. Le linee che delimitano i diversi spazi di lavoro definiscono il limite massimo di posizionamento del TCP della macchina; come imposto tale limite non oltrepassa mai i confini esterni della macchina anche se il robot è in grado di farlo. L'aumento delle τ limite aumenta tutti gli spazi di lavoro, tranne quello ottenuto con $\alpha_2 = 30^\circ$ dove il limite imposto ai giunti risulta predominante rispetto ai limiti di moltiplica.

L'algoritmo genetico converge verso le soluzioni trovate nelle maniere mostrate in figura 3.9. Nelle 4 figure si vedono 4 delle simulazioni effettuate, una per ogni valore di α_2 . In nero è rappresentata la convergenza della funzione di costo riferita al miglior individuo per ogni generazione; il miglior individuo della generazione finale corrisponde alla minimizzazione della funzione di costo. In blu è rappresentata la media della funzione di costo per ogni generazione; mano mano che l'algoritmo genetico procede la media tende al valore minimo. Si noti come l'algoritmo arrivi subito nelle vicinanze del risultato migliore per poi convergere più o meno lentamente. In figura 3.10 si vede la convergenza dei singoli parametri α , l e d sempre per i diversi valori di α_2 .

Infine in figura 3.12 sono mostrate le moltipliche di forza e velocità per il caso $\alpha_2 = 30^\circ$ e $\tau_{f,max} = \tau_{v,max} = 3$. Si può notare come in questo caso tutte e due i fattori di moltiplica siano al di sotto del limite 3 imposto e quindi come lo spazio di lavoro è limitato unicamente dai vincoli sui giunti della macchina. Si noti come è rispettata la dualità cinetostatica per cui dove si hanno elevate moltipliche di forza si hanno basse moltipliche di velocità e viceversa. Le moltipliche mostrate sono relative ad uno dei tre slider della macchina e mostrano come le moltipliche di forza sono elevate vicino allo slider mentre quelle di velocità sono elevate nelle posizioni più distanti dallo slider stesso.

3.3.6 Ottimizzazione dimensionale

Nello studio dimensionale non si vuole più massimizzare l'area di lavoro della macchina ma si vuole coprire un'area specifica e fare un'ottimizzazione che porti a specificare i valori dei parametri scelti per la progettazione e costruzione del *Linear Delta*. Come descritto nella sezione 3.2 di questo capitolo lo spazio di lavoro complessivo della macchina a 5 gdl è stato tradotto in uno spazio di lavoro piano per il *Linear Delta*. Per compensare le rotazioni richieste di rollio e beccheggio pari a $\pm 45^\circ$ basterebbe coprire un quadrato di lato $230[mm]$, tabella 3.1. Per dare la possibilità alla macchina di compensare rotazioni maggiori, fino a 90° limite massimo, si dovrebbe coprire un'area maggiore, un quadrato di lato $250[mm]$. Si è deciso allora di ottimizzare la macchina in modo da coprire tutte le rotazioni possibili dell'*Agile Eye*; per fare questo si è preso il quadrato di lato $250[mm]$ e lo si è maggiorato fino ad ottenere un quadrato di lato $300[mm]$. Questa ulteriore aumento dell'area di lavoro richiesta è stata fatto per due motivi:

- margine di sicurezza per la macchina
- limitare la variabilità dell'algoritmo genetico

Il primo motivo risiede nel fatto che non si vuole che lo spazio di lavoro del *Linear Delta* sia identico a quello richiesto. Questo comporterebbe che al minimo errore di posizionamento della macchina si andrebbe incontro a danni sulla stessa più o meno gravi. Progettando una macchina con uno spazio di lavoro maggiore ci si garantisce

Tabella 3.4: Range dei parametri dell'ottimizzazione dimensionale

	range	vincoli
d	400[mm]	$\alpha_2 = 60^\circ$ $\tau_{f,max} = \tau_{v,max} = 3$
l	400-1000[mm]	
D	600-1000[mm]	
α	90°-170°	
Area da Coprire	300x300[mm]	

un margine di errore. Il secondo motivo deriva dal fatto che l'algoritmo genetico non garantisce la convergenza verso la soluzione ottima e questo è tanto più vero quanto maggiori sono le soluzioni possibili. Nell'ottimizzazione dimensionale si è impostato il problema con la minimizzazione della funzione 3.2; questa funzione esprime la copertura dell'area desiderata. Nel momento in cui l'area desiderata è relativamente piccola rispetto alla macchina questa riesce con facilità a coprire lo spazio richiesto anche per differenti valori dei parametri α , D , d ed l ; questo comporta una varietà di soluzioni e l'algoritmo genetico non è in grado di convergere verso una di esse ma per differenti simulazioni darà risultati diversi. Aumentando l'area di lavoro il numero di soluzioni fattibili diminuisce rendendo così più efficace il lavoro dell'algoritmo.

Lo studio dimensionale viene effettuato rispettando i range espressi in tabella 3.4. Durante questa fase non vengono fatti variare i valori di α_2 , $\tau_{f,max}$ e $\tau_{v,max}$; il primo ha un valore di 60° mentre i secondi sono stati scelti come valore desiderati e posti pari a 3. Dalla tabella si vede come il parametro d è in realtà costante. Dall'ottimizzazione adimensionale si è visto come questo parametro debba essere il più piccolo possibile; dalla fase di progettazione è stato preso questo valore in grado di garantire il posizionamento dell'*Agile Eye* sopra il *Linear Delta*. Per i valori del range del parametro D si è partiti considerando i risultati dello studio adimensionale. Da tale studio si vede come per i valori di α_2 e τ_{max} scelti si ha un indice di copertura cp poco inferiore al 55%. Considerando tale valore si può facilmente calcolare il valore D che porta il *Linear Delta* a coprire l'area richiesta(A_c):

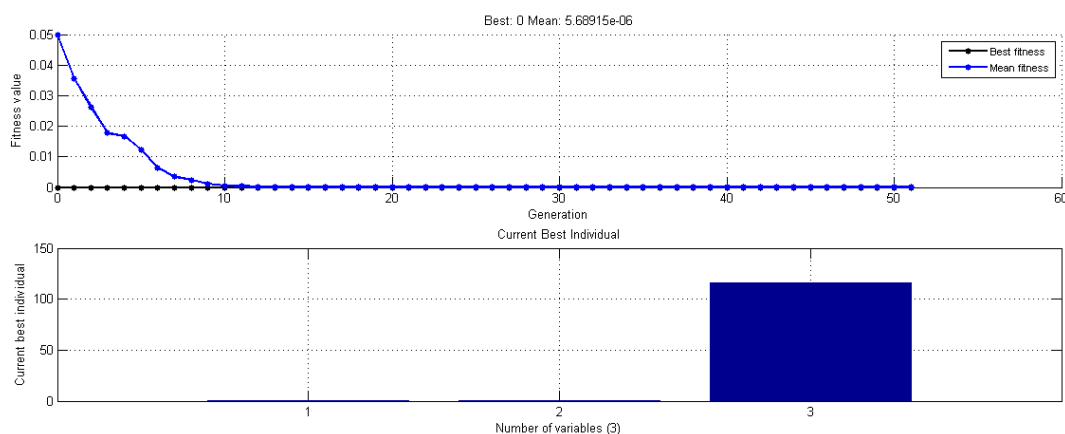
$$D = \sqrt{\frac{4A_c}{cp\pi}} \quad (3.6)$$

In questo caso si ottiene un valore D di circa 457[mm]. Siccome questo valore è il minimo possibile per coprire l'area richiesta e non tiene conto della forma dello spazio di lavoro desiderato si è imposto un valore minimo più grande, 600[mm], e un valore massimo di 1000[mm] per cercare di ottenere una macchina che risulti compatta. Conseguentemente ai valori di D sono stati scelti i valori di l , a cui è stato imposto in accordo con lo studio adimensionale un valore massimo dello stesso ordine di D , e di α .

Dello studio dimensionale si possono osservare i risultati in tabella 3.5. Come si può notare non si è ottenuta una soluzione univoca ma una pluralità di soluzioni. Questo è dovuto al fatto che con i range impostati la macchina ha più soluzioni possibili in grado di risolvere il problema imposto. Dalla figura 3.13, raffigurante uno degli studi dimensionali, vediamo come il valore migliore della funzione di costo è nullo; questo sta a significare che lo spazio di lavoro del *Linear Delta* è in grado di coprire tutta l'area desiderata. Avendo una pluralità di soluzioni bisogna decidere con che criterio andare a

Tabella 3.5: Risultati dello studio dimensionale

Parametro	studio 1	studio 2	studio 3
l [mm]	660	610	580
D [mm]	950	920	890
α	93°	124°	117°

**Figura 3.13:** Convergenza dell'algorithmo genetico nell'ottimizzazione dimensionale

selezionare i valori finali dei parametri scelti. Osservando la figura 3.14, rappresentante le moltipliche delle forze e velocità ottenute per due diversi valori di α ottenuti dall'ottimizzazione, 124° e 93° , si nota come da valori più elevati di α risultano moltipliche più basse. Questo risultato è in accordo con lo studio adimensionale dove si è notato come aumentando il limite sulle τ si otteneva un α vicino ai 63° . A questo punto si è scelto un α pari a 120° . Questa scelta oltre a minimizzazione i fattori di moltiplica porta in fase progettuale ad avere sulle guide una migliore distribuzione dei carichi derivanti dall'estrusore, inoltre tale valore conferisce una simmetria al robot tale che gli attuatori del sistema, tre motori elettrici, sono sollecitati nella stessa maniera e possono essere scelti esattamente identici senza distinzioni.

Avendo definito l'angolo α per calcolare il valore degli altri due parametri si è deciso di sfruttare ancora l'algorithmo genetico ma con solo due variabili, D ed l , in modo da ottimizzare tali valori.

Dallo studio finale i valori dei parametri scelti per lo studio di ottimizzazione e che definiscono la geometria della macchina sono:

$$d = 400[mm] \quad D = 913[mm] \quad l = 598[mm] \quad \alpha = 120^\circ \quad (3.7)$$

La fase di ottimizzazione non è però slegata da quella di progettazione. In fase di progettazione l'angolo α_2 non ha raggiunto il valore di 60° ma bensì di 45° . Questo valore seppur minore non ha inficiato sulla possibilità della macchina di svolgere il proprio compito con i valori dei parametri calcolati. Del robot finale l'indice di copertura ottenuto è abbastanza basso, $cp = 18.2\%$, un valore ben al di sotto del 39.3% ottenuto in fase adimensionale. Il risultato dello studio dimensionale è stato fortemente influenzato dalla forma quadrata dello spazio di lavoro, inoltre esigenze di tipo costruttivo hanno

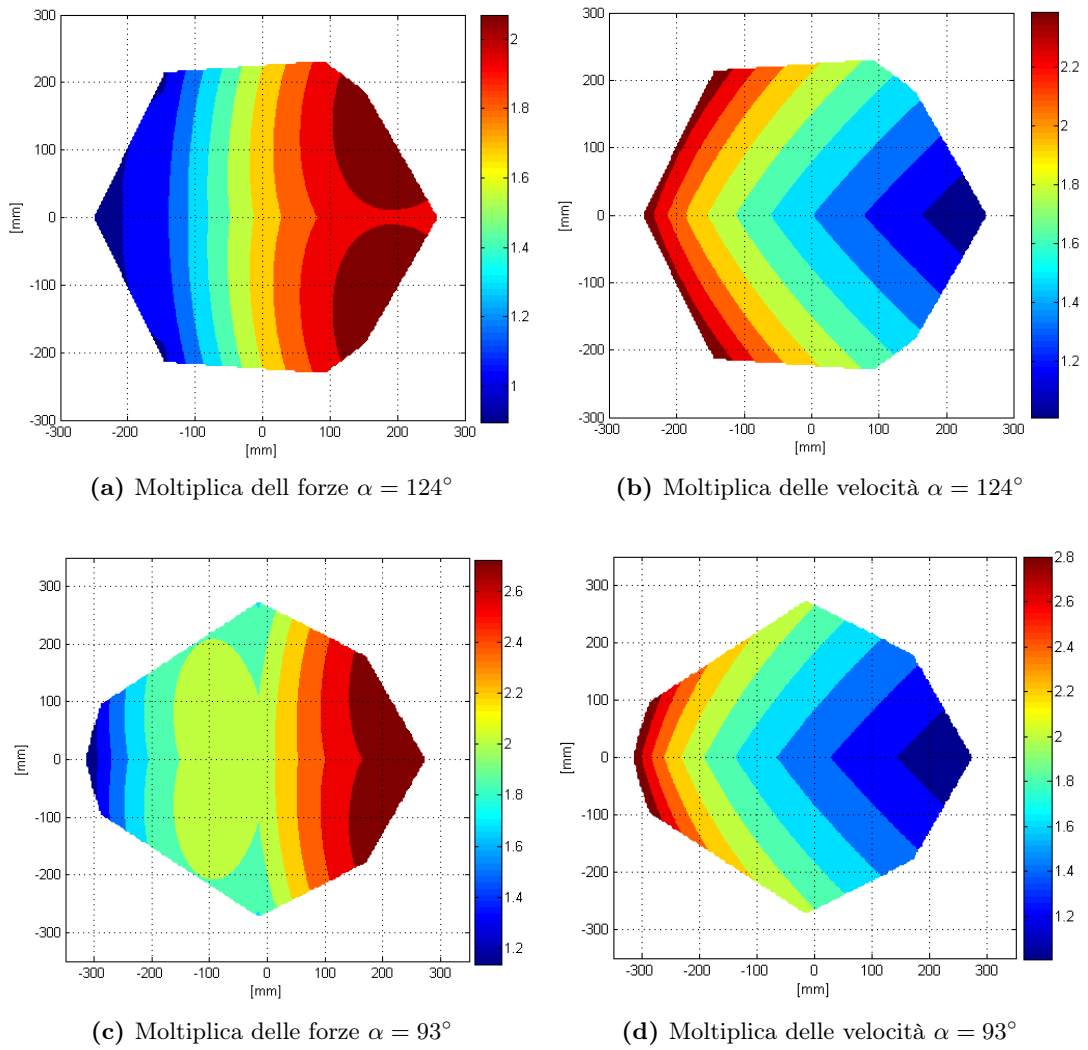


Figura 3.14: Multiplica delle forze e delle velocità al variare di α

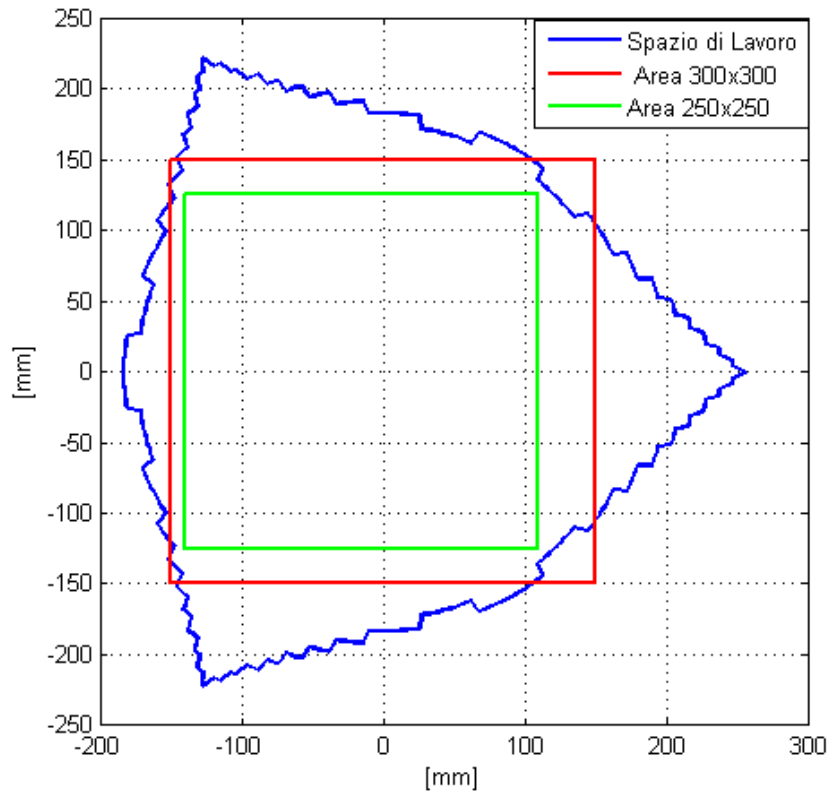


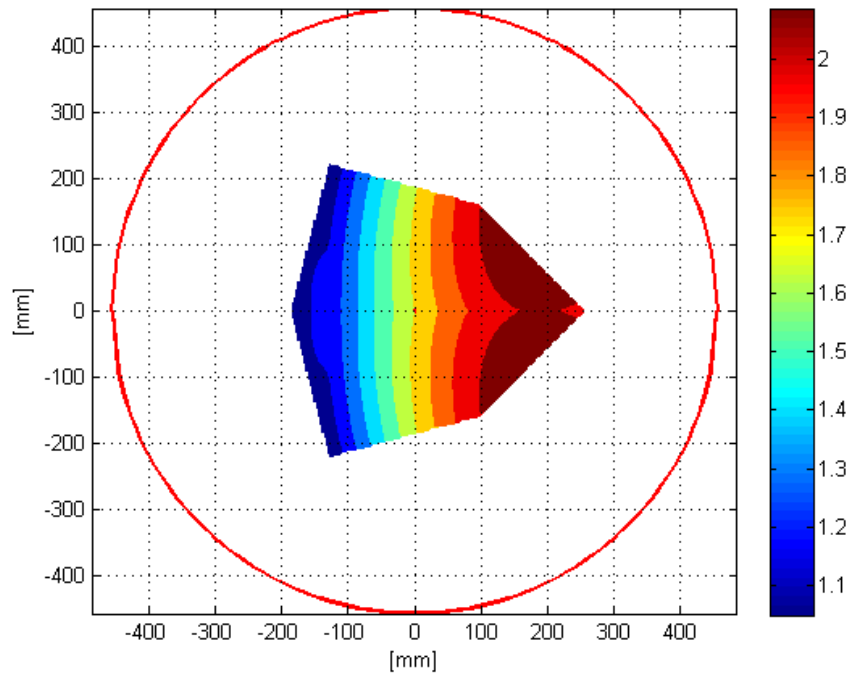
Figura 3.15: Spazio di lavoro finale del *Linear Delta*

fatto privilegiare altre scelte rispetto alla massimizzazione dell'area coperta che era l'obiettivo dello studio adimensionale, senza che questo però abbia fatto perdere di vista la richiesta iniziale di uno specifico spazio di lavoro e il rispetto di precisi vincoli. Con i valori dei parametri trovati la macchina è in grado di coprire l'area richiesta nel rispetto dei vincoli imposti. In figura 3.15 è visibile lo spazio di lavoro effettivo e finale del *Linear Delta*. Non si è in grado di coprire l'area 300x300[mm] ma si riesce a coprire un'area 250x250[mm]. Il *Linear Delta* è in grado di compensare qualsiasi tipo di rotazione derivante dall'*Agile Eye*. In figura 3.16 sono visibili le moltipliche finali del robot, tutte al di sotto dei limiti imposti.

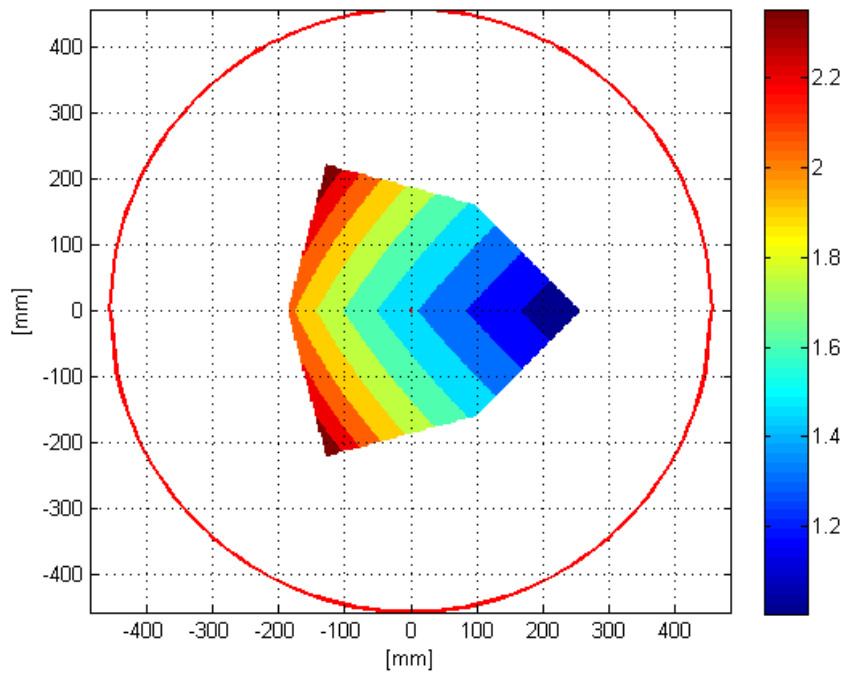
3.4 Sintesi cinematica dell'Agile Eye

L'ottimizzazione del robot è eseguita unicamente sul *Linear Delta* avendo tradotto lo spazio di lavoro desiderato in uno spazio equivalente piano. A livello dell'*Agile Eye* l'unico interesse è la realizzabilità delle rotazioni richieste. Per raggiungere tale scopo viene scelta una struttura dei link (che hanno una forma di quarti di cerchio) concentrica in modo da evitare qualsiasi interferenza tra i link stessi. Nei capitoli di progettazione e analisi dinamica è visibile tale configurazione. Le scelte fatte in fase di ottimizzazione sono state due:

- posizione dei motori opposta



(a) Moltiplica delle forze



(b) Moltiplica delle velocità

Figura 3.16: Valori finali di moltiplica del *Linear Delta*

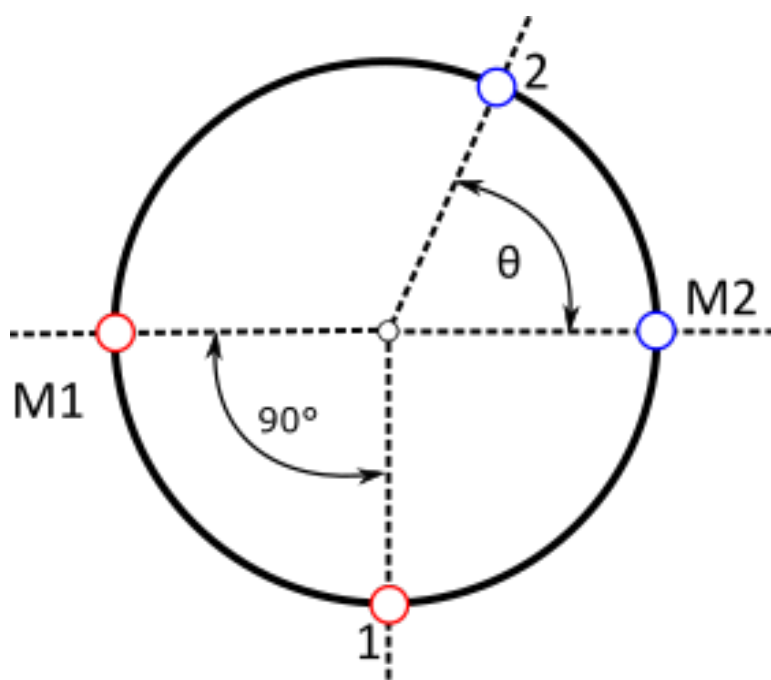


Figura 3.17: Posizione dei motori dell'*Agile Eye*

Tabella 3.6: Moltiplica delle forze per il motore 2 al variare di θ

θ	τ_f	τ_v
30°	3.04	1.47
45°	3.12	1.49
60°	3.86	1.35
90°	-	-
120°	3.86	1.35
135°	3.12	1.49
150°	3.04	1.47

- minimizzazione moltiplica delle forze e delle velocità

Facendo riferimento alla figura 3.17 si può notare come i due motori siano stati posizionati uno opposto all'altro. Questa posizione serve a garantire un bilanciamento del peso dell'*Agile Eye* in modo tale che il suo baricentro finisca il più vicino possibile al centro della piattaforma. Più il baricentro dell'*Agile Eye* è decentrato maggiori saranno le coppie di trasporto che inevitabilmente si scaricheranno sul *Linear Delta*. Fatto questo si può notare sempre in figura il posizionamento dei due punti di attacco dei link con la piattaforma. Il punto 1, legato a M1, è tenuto fisso ed a 90° dal motore stesso, mentre il punto 2 è reso variabile secondo l'angolo θ . Al variare di θ varia la moltiplica delle forze e delle velocità per il secondo motore, come visibile in tabella 3.6, dove al variare di θ è rappresentato il valore massimo di moltiplica trovato.

Si può notare come la minima moltiplica delle velocità la si ha avvicinandosi a $\theta = 90^\circ$, mentre il minimo di moltiplica delle forze si ha per $\theta = 0$ e $\theta = 180$. Tutti e tre questi valori non sono fattibili in quanto portano ad avere configurazioni singolari per

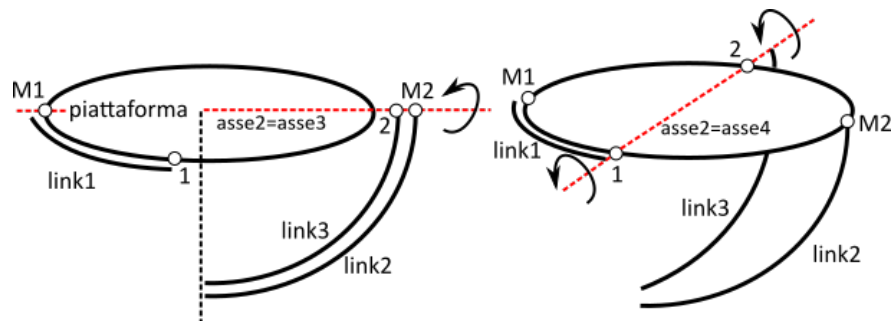


Figura 3.18: Configurazioni singolari dell'*Agile Eye*

l'*Agile Eye* come è descritto nella sezione A.3. Si sceglie allora $\theta = 45^\circ$, un valore che permette di tenere basso i fattori di moltiplica e rimanere distanti dalle configurazioni singolari del robot.

3.4.1 Configurazioni Singolari

Come per il *Linear Delta* anche per l'*Agile Eye* bisogna assicurarsi che nel suo spazio di lavoro non venga a trovarsi in configurazioni singolari. Scelta l'architettura cinematica descritta per l'*Agile Eye* si presentano due possibilità di configurazione singolare. Facendo riferimento alla figura 2.8 e alla figura 3.17 si può capire quali esse siano. Al variare di θ l'asse 4 di rotazione si viene a trovare per $\theta = 90^\circ$ allineato con l'asse 2. In questa posizione la piattaforma dell'*Agile Eye* è libera di ruotare intorno ai due assi sovrapposti trovandosi in una situazione di labilità. Nel momento in cui invece l'asse 4 viene ad allinearsi con l'asse 3 i link 2 e 3 si trovano liberi di ruotare attorno allo stesso asse senza provocare una rotazione della piattaforma. Mentre la prima configurazione singolare può avvenire solamente per una cattiva progettazione del robot (infatti basta non montare inizialmente i due assi allineati e il loro angolo relativo rimane per ogni posizione della struttura invariato), la seconda configurazione risulta essere più critica. Durante il moto del robot i link 2 e 3 possono muoversi uno relativamente all'altro, questo può portare all'allineamento dei due assi di rotazione suddetti e alla perdita del controllo sulla macchina. Durante lo studio cinematico di questo sistema ci si è accertati che questo non avvenisse per tutte le possibili rotazioni del robot. Si è proceduto sia verificando direttamente che non fossero allineati i versori degli assi di rotazione critici, sia controllando che il determinante dello Jacobiano e del suo inverso fosse non nullo.

In figura 3.18 sono rappresentate schematicamente le due configurazioni critiche. A destra si ha il caso in cui l'asse 4 è allineato all'asse 2, mentre a sinistra si vede il caso in cui l'asse 2 è allineato con l'asse 3; in quest'ultima configurazione i link 2 e 3 risultano appartenere ad uno stesso piano.

Capitolo 4

Analisi Dinamica

4.1 Introduzione

In questo capitolo viene svolta un'analisi dinamica atta a valutare le forze in gioco nel sistema in movimento. Viene mostrato il procedimento seguito per il dimensionamento dei gruppi motoriduttori e per la scelta delle guide lineari del *Linear Delta*, infine viene svolta una valutazione delle forze e coppie più importanti per lo sviluppo della fase progettuale. Si vuole far osservare al lettore come la progettazione di una macchina è un procedimento ricorsivo ed il lavoro svolto in questo capitolo non è separato da quello svolto nell'ottimizzazione cinematica e nella progettazione come ricordato nelle rispettive introduzioni delle stesse. I procedimenti di questo capitolo sono stati sviluppati attraverso l'uso del software *Adams*.

4.2 Modello

Per valutare le forze in gioco del robot viene sviluppato un modello dinamico del *Linear Delta* attraverso l'uso del software *Adams*. In figura 4.1 è possibile vedere il modello in posizione centrata, cioè con la piattaforma al centro della stampante di diametro D . In rosso si ha la piattaforma, in arancione i link che vanno a comporre i parallelogrammi che collegano la piattaforma agli slider in blu. Nel modello viene incluso direttamente l'*Agile Eye* che poggia sopra la piattaforma del *Linear Delta*. La struttura dell'*Agile Eye*, compresi i servomotori che devono azionarlo, entrano in questo modello come massa aggiuntiva sulla piattaforma. In tabella 4.1 sono elencati i corpi del modello con i dati di masse ed inerzie, e i vincoli del sistema. I perni ed i link sono i corpi che formano il parallelogramma del sistema. Un perno collega la piattaforma a due link, i quali a loro volta sono collegati ad un secondo perno collegato ad uno slider. Il sistema slider-parallelogramma-piattaforma riproduce la catena PUU(Prismatic-Universal-Universal) secondo la quale è stato fatto lo studio cinematico del sistema. Le masse ed inerzie del sistema sono ricavate dalla fase di progettazione, o come valori di un singolo corpo o come unione di più parti che nel modello sono rappresentate come un corpo unico. Le inerzie I_z , I_x e I_y indicano per perni e link, che non sono altro che cilindri, le inerzie attorno ai loro assi centrali e principali. Per la piattaforma e gli slider che sono in grado di compiere solo traslazioni il valore delle inerzie è irrilevante ai fini del risultato. La massa di 16[kg] per la piattaforma tiene conto di:

- struttura dell'*Agile Eye*

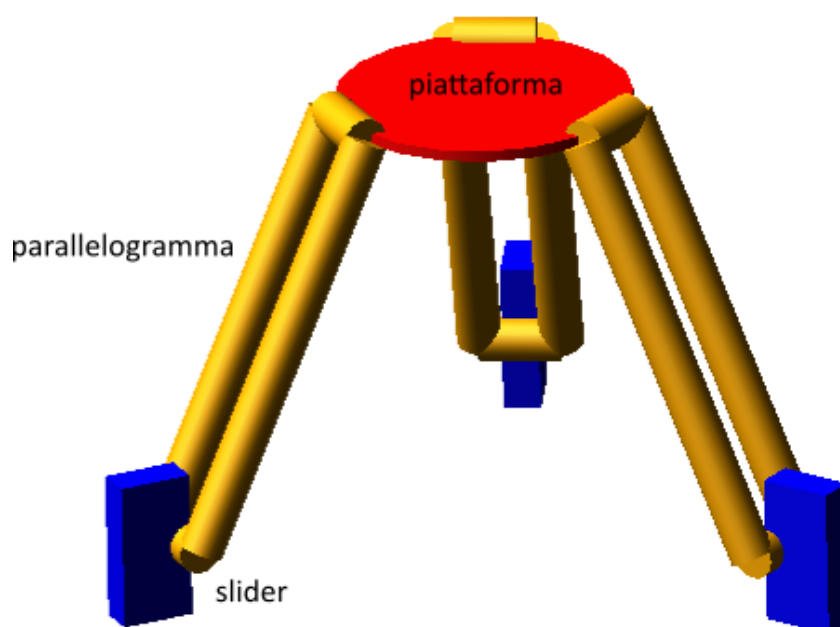


Figura 4.1: Modello Adams del *Linear Delta*

Tabella 4.1: Dati del modello Adams

Corpo	Massa[kg]	$I_z[kgmm^2]$	$I_x = I_y[kgmm^2]$	Numero
piattaforma	16	-	-	1
perno	0.3	19.0	263.0	6
link	0.55	80.0	16002.7	6
slider	3.1	-	-	3
Vincolo			Numero	
Sferico			6	
Revolute			12	
Traslazione			3	

- motori e riduttori
- materiale da deporre

Sulla piattaforma dell'*Agile Eye* deve essere deposto del materiale che possiede una propria densità. Conoscendo tale densità si può calcolare la massa maggiore che grava sul robot ipotizzando di riempire il cubo di lato 100[mm] richiesto come spazio di lavoro finale. Non essendo disponibile il dato effettivo della densità del materiale che viene estruso dalla stampante si fa riferimento a dei valori presi da uno studio su una tecnologia simile in cui viene estrusa una polvere di acciaio con un binder di paraffina [32]. In questi esperimenti viene dichiarata una densità teorica del materiale di $8[g/cm^3]$ e dei valori sperimentali rilevati dopo una fase di sinterizzazione compresi tra i 5 e i $6[g/cm^3]$. Usando il peggiore tra i dati si ipotizza una massa totale del cubo di $8[Kg]$. A questa massa va aggiunta la massa della struttura dell'*Agile Eye* ma soprattutto la massa dei motori e dei riduttori. Alla fine si è ipotizzata una massa complessiva per i gruppi motoriduttori di $8[kg]$ che aggiunti agli 8 del materiale portano ai $16[kg]$ assegnati alla piattaforma.

In figura 4.2 è rappresentato il parallelogramma con la disposizione dei vincoli e lo slider libero di muoversi lungo la direzione delle guide lineari. Nella realtà costruttiva i vincoli tra link e perni sono tutti del tipo sferico grazie all'utilizzo di snodi sferici; due rotazioni sono però limitate sia dai limiti dello snodo sferico che dalla soluzione costruttiva adottata. Si sono così tradotti due vincoli sferici in due vincoli revolute segnati in rosso in figura 4.2a. I vincoli revolute tra perno e piattaforma e perno e slider garantiscono una rotazione relativa che non è altro che quella indicata con α_1 nella sezione 3.3.4, mentre la disposizione dei vincoli revolute e sferici permette la rotazione relativa tra link e perni che coincide con α_2 .

Il modello complessivo del *Linear Delta* così costruito, numero di corpi, vincoli e loro disposizione, risulta avere 3 gdl. Imponendo degli spostamenti nel tempo ai 3 slider si ottiene il moto desiderato dalla piattaforma.

4.3 Dimensionamento del gruppo motoriduttore

Parte fondamentale dell'analisi dinamica è il dimensionamento del gruppo motoriduttore. I tre slider del *Linear Delta* possono muoversi lungo delle guide lineari messe in movimento dal suddetto gruppo. I tre attuatori, viste le scelte fatte in fase di ottimizzazione cinematica che hanno portato ad avere un'architettura cinematica con simmetria a 120° , saranno presi identici.

Per fare le giuste valutazioni vengono svolte una serie di prove in cui mosso il robot vengono valutate le coppie e accelerazioni angolari che devono essere esercitate in uscita al riduttore. Facendo riferimento poi al caso più sfavorevole, cioè dove vengono richieste coppie ed accelerazioni maggiori, si procede al dimensionamento.

4.3.1 Procedimento

I motori elettrici presentano una curva caratteristica Coppia-Velocità caratterizzata da due zone. Una in cui il motore può lavorare a tempo infinito ed un'altra invece nel quale può lavorare per un tempo limitato. Questa distinzione risiede principalmente nel fatto che all'aumentare di coppia e velocità angolare aumenta il calore generato dal motore. Bisogna garantire al motore la possibilità di smaltire tale calore per dissipazione. Oltre

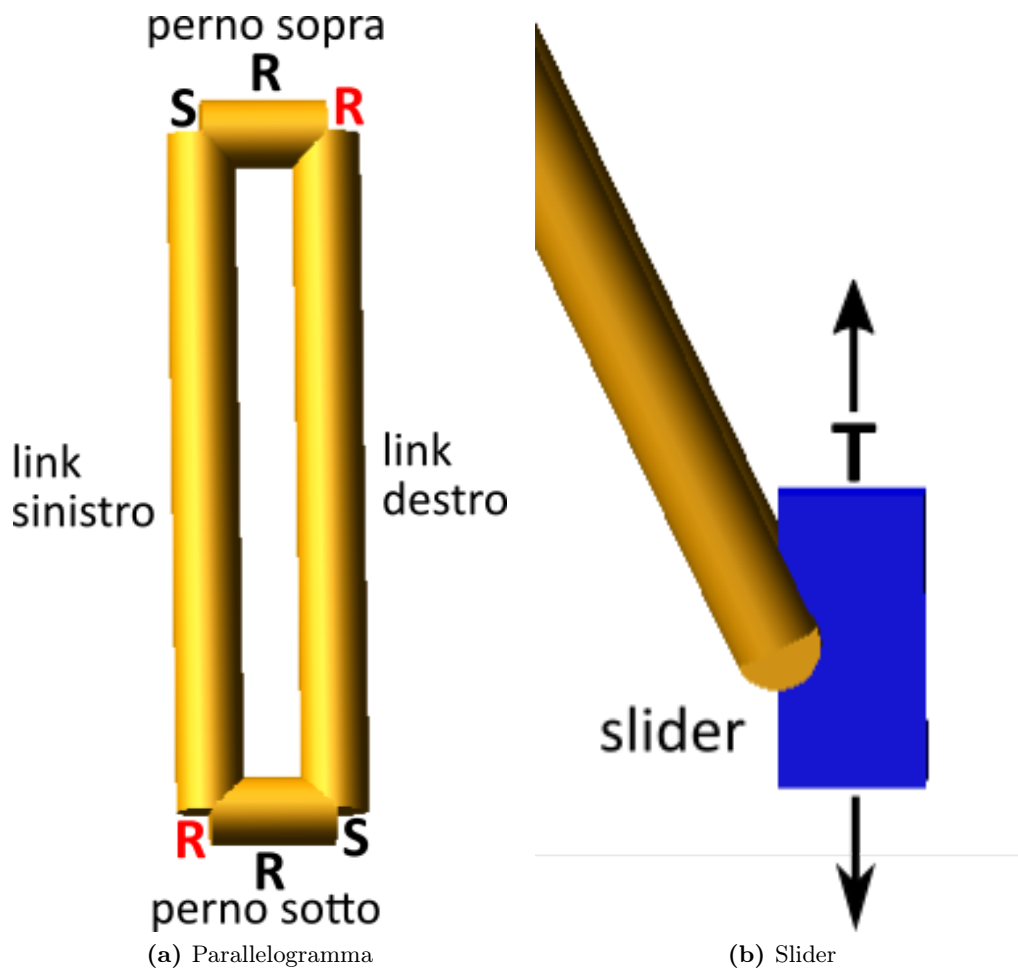


Figura 4.2: Vincoli del modello

a questa considerazione fondamentale nella scelta del motore bisogna rispettare i limiti di coppia massima erogabile, $C_{m,max}$, e velocità massima, $\omega_{m,max}$, ed il relativo accoppiamento con il riduttore. Per ogni gruppo motoriduttore selezionato si ha bisogno che rispetti le seguenti condizioni:

- rispetto dei limiti sulla coppia massima:

$$\max|C_m(t)| < C_{m,max} \quad (4.1)$$

- Valore quadratico medio entro il valore di coppia nominale:

$$C_{m,rms} < C_{m,nom} \quad (4.2)$$

- rispetto della velocità massima

$$\max|\omega_m(t)| < \omega_{m,max} \quad (4.3)$$

Per quanto riguarda il riduttore, che definisce il rapporto di trasmissione τ tale che $\omega_r = \tau\omega_m$, bisogna verificare l'ammissibilità delle coppie e velocità in entrata al riduttore stesso, cioè la $C_{m,max}$ e la $\omega_{m,max}$. Le grandezze con il pedice m e quelle con il pedice r sono relative rispettivamente al lato motore e riduttore-utilizzatore.

Seguendo la procedura descritta da H.Giberti, [33] [34] [35], viene presentato il metodo con cui si arriva a valutare ed a scegliere il gruppo motoriduttore adeguato. Partendo da un bilancio di potenza tra lato motore ed utilizzatore, espresso tutto al lato riduttore, possiamo scrivere:

$$C_m = \tau C_r^* + J_m \frac{\dot{\omega}_r}{\tau} \quad (4.4)$$

Dove il termine τ è un'incognita che deve essere determinata, il termine C_r^* rappresenta la coppia resistente del sistema e l'ultimo termine tiene conto dell'inerzia del motore J_m , anche questa da determinare. Svolgendo il valore quadratico medio di entrambi i membri dell'equazione 4.4 e risistemando i termini si arriva a scrivere:

$$\alpha > \beta + [C_{r,rms}^* \left(\frac{\tau_{rid}}{\sqrt{J_m}}\right) - \dot{\omega}_{r,rms} \left(\frac{\sqrt{J_m}}{\tau_{rid}}\right)]^2 \quad (4.5)$$

dove α , definito *fattore accelerante*, ha la seguente espressione:

$$\alpha = \frac{C_{m,nom}^2}{J_m} \quad (4.6)$$

Risulta evidente come α è un termine incognito funzione del motore che viene scelto. Il termine β , definito *fattore di carico*, ha la seguente espressione:

$$\beta = 2[\dot{\omega}_{r,rms} C_{r,rms}^* + (\dot{\omega}_r C_r^*)_{medio}] \quad (4.7)$$

Questo termine dipende solo dal carico e dal moto imposto al sistema. Si ricorda che i termini di RMS sono definiti come:

$$C_{r,rms}^* = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [C_r^*(t)]^2 dt} \quad \dot{\omega}_{r,rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [\dot{\omega}_r(t)]^2 dt} \quad (4.8)$$

Il rispetto della disequaglianza 4.5 garantisce che il motore lavori mediamente nel campo di lavoro infinito e non si abbiano problemi di surriscaldamento. Per verificare tale disequaglianza α deve essere maggiore di β , nel caso limite uguale. Tale eventualità si verifica per uno specifico valore del rapporto di trasmissione definito rapporto ottimo, τ_{opt} , che si ottiene annullando il termine quadratico.

$$\tau_{opt} = \sqrt{J_m \frac{\dot{\omega}_{r,rms}}{C_{r,rms}^*}} \quad (4.9)$$

Se si sceglie un riduttore con $\tau = \tau_{opt}$ bisogna garantire semplicemente $\alpha > \beta$. Il rapporto τ_{opt} non è detto sia disponibile a livello commerciale, allora risolvendo la disequazione 4.5 rispetto a $\tau/\sqrt{J_m}$ si può definire un intervallo all'interno del quale qualsiasi valore di τ soddisfa la disequazione.

$$\tau_{min,max} = \sqrt{J_m} \frac{\sqrt{\alpha - \beta + C_{r,rms}^* \dot{\omega}_{r,rms}} \pm \sqrt{\alpha - \beta}}{2C_{r,rms}^*} \quad (4.10)$$

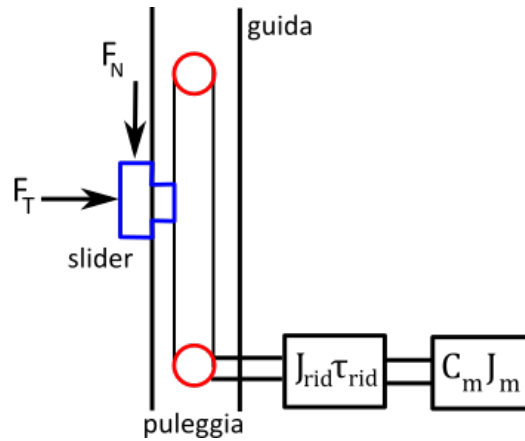


Figura 4.3: Sistema motore-riduttore-guida-slider

Il valore di τ scelto deve garantire che la velocità richiesta lato utilizzatore sia erogabile dal motore. Si definisce un valore di τ tale che alla massima velocità del motore corrisponda la massima velocità del carico:

$$\tau_p = \frac{\omega_{r,max}}{\omega_{m,max}} \quad (4.11)$$

Il procedimento con cui si arriva a scegliere il gruppo motoriduttore consiste nei seguenti passaggi:

1. si sceglie un moto da imporre al sistema e si ricavano i termini $C_r^*(t)$ e $\dot{\omega}_r(t)$ definendo così β
2. si sceglie un motore definendo così $C_{m,nom}$, J_m e quindi α in modo tale che sia maggiore di β
3. si ricavano i valori di τ_{min} , τ_{max} e τ_p . Se $\tau_p > \tau_{max}$ bisogna scegliere un motore con α maggiore. Se $\tau_{min} < \tau_p < \tau_{max}$ bisogna scegliere un riduttore con $\tau_p < \tau < \tau_{max}$. Se $\tau_p < \tau_{min}$ tutto l'intervallo tra τ_{min} e τ_{max} è accettabile
4. scelto il valore di τ bisogna verificare che la coppia massima richiesta sia erogabile dal motore
5. bisogna verificare la compatibilità tra motore e riduttore

4.3.2 Coppia resistente

Il termine C_r^* viene valutato attraverso il modello Adams. In figura 4.3 è mostrato uno schema di come il sistema motoriduttore è collegato allo slider. Il gruppo è direttamente calettato su una puleggia interna alla guida; mettendola in rotazione si muove una cinghia collegata allo slider, parte integrante della guida. In Adams ciò che viene valutata è la forza parallela al moto dello slider stesso che coincide con la forza che bisogna imprimere al corpo per ottenere il moto imposto. Questa forza può essere facilmente tradotta nella coppia in uscita dal riduttore conoscendo il diametro della puleggia della guida, d_p . La coppia resistente quindi vale:

$$C_r^*(t) = F_N(t)d_p/2\eta_s \quad (4.12)$$

Il termine di rendimento η_s tiene conto degli attriti interni al sistema ed in particolare di quello della guida che si genera per la presenza della forza F_T . Spesso le guide lineari hanno da catalogo un valore di attrito statico e dinamico con cui valutare le forze in più che deve essere esplicitata per vincere l'attrito stesso. Nel caso delle guide scelte questi dati non sono disponibili. Si è scelto un valore di $\eta_s = 0.9$ che è un valore che supera le necessità di tener conto del solo attrito della guida ma maggiore la coppia resistente richiesta tenendo conto degli attriti interni al sistema.

In fase finale di validazione del gruppo motoriduttore alla coppia resistente si può aggiungere il contributo dovuto alla presenza dell'inerzia del riduttore, J_{rid} , e tenere conto del rendimento meccanico del riduttore stesso. Questo rendimento, di solito molto elevato, viene considerato inizialmente unitario.

Nella stessa maniera in cui è stata calcolata la coppia resistente si può facilmente tradurre l'accelerazione lineare dello slider, a_s , in una accelerazione angolare della puleggia.

$$\dot{\omega}_r = \frac{2a_s}{d_p} \quad (4.13)$$

4.3.3 Legge di moto

Per valutare la coppia resistente bisogna prima imporre un moto al *Linear Delta*. Quello che viene fatto in Adams è assegnare una legge di moto alla piattaforma, ricavare il moto degli slider, assegnare tale moto agli slider. Questo procedimento è necessario per rispettare la realtà del sistema in cui sono gli slider ad essere messi in movimento e la piattaforma si muove di conseguenza e non viceversa. La scelta di questo moto è critica per il risultato finale ed è determinata dalla scelta di:

- traiettoria della piattaforma
- velocità della piattaforma

Appare evidente come se si richiede di coprire stesse traiettorie con velocità sempre più elevate si avranno accelerazioni sempre maggiori. Le inerzie generate aumentano in modulo gravando in maniera sempre più importante sulla struttura e ne risulta un gruppo motoriduttore di taglia più grossa. Nella richiesta di uno spazio di lavoro cubico di lato 100[mm] non è stato specificato il tipo di lavoro richiesto alla macchina. Se fosse noto un percorso tipo del robot lo si simulerebbe e sui risultati derivanti si farebbero le scelte più adeguate. Non essendo però fornita alcuna indicazione in tal senso si è deciso di imporre una serie di leggi di moto sinusoidali con cui andare a coprire l'intero spazio di lavoro. Essendo la simulazione fatta sul *Linear Delta* lo spazio di lavoro è il quadrato equivalente piano di lato 300[mm]. In figura 4.4 è rappresentato in rosso lo spazio di lavoro su cui viene effettuato lo studio dinamico. Sono considerati punti di interesse il centro del quadrato e altri 8 punti sul bordo. Per via della disposizione a 120° delle guide e dello spazio di lavoro quadrato si può notare una simmetria rispetto all'asse x . Questo permette di limitare lo studio a soli 6 punti significativi, da 1 a 6, in quanto per i punti 7,8 e 9 si avrebbero risultati identici per la guida 1 rispetto ai punti

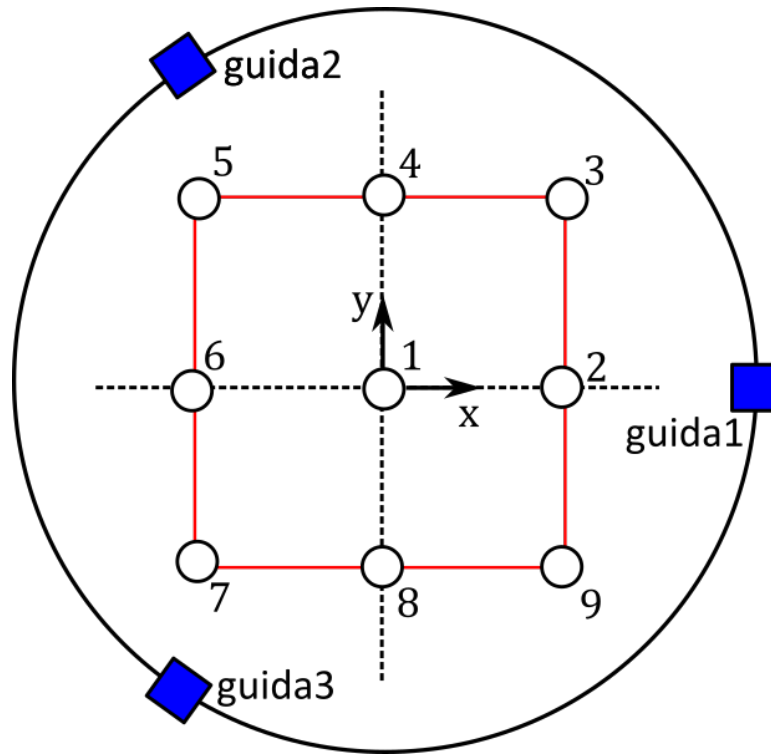


Figura 4.4: Punti scelti per lo studio dinamico in Adams

5,4 e 3, mentre per le guide 2 e 3 si avrebbero risultati speculari; in ogni caso non si otterrebbero informazioni aggiuntive rispetto a quelle già ottenute sugli altri punti.

La campagna di prove dinamiche viene così effettuata:

- posizionamento di un modello del *Linear Delta* con centro della piattaforma in uno dei 6 punti scelti sullo spazio di lavoro;
- imposizione di uno spostamento della piattaforma lungo una direzione x , y o z ;
- spostamento imposto, $x(t)$, $y(t)$ o $z(t)$ di tipo sinusoidale:

$$x(t) = 150 * \sin(2\pi t) \quad (4.14)$$

- Vengono imposti solamente moti che non fanno uscire la piattaforma dallo spazio di lavoro.

L'ultima nota tiene conto che in alcuni punti non è possibile spostarsi in alcune direzioni. Alla fine si hanno 11 studi dinamici; 3 nel punto $1(x, y, z)$, due nei punti 2, 6(y, z), due nel punto 4(x, z) e uno nei punti 3 e 5 lungo z . Il moto sinusoidale imposto ha ampiezza di $150[mm]$, questo sta a significare per esempio che per uno spostamento lungo x a partire dal punto 1 il centro della piattaforma arriva a toccare il punto 2, si ferma e torna indietro fino al punto 6 per infine tornare al centro, il tutto in $1[s]$ essendo imposta una frequenza di movimentazione di $1[Hz]$. La frequenza di $1[Hz]$ viene posta come limite superiore per contenere le accelerazioni della piattaforma. Il materiale deposto sulla piattaforma si muove inevitabilmente con essa condividendone percorso, velocità e soprattutto accelerazione. Oltre certi valori di accelerazione è lecito aspettarsi

che il materiale deposto non sia più in grado di reggere gli sforzi che si vengono a generare di conseguenza, portando così a rottura il pezzo ancor prima di essere completato.

4.3.4 Risultati e scelta gruppo motoriduttore

Svolgendo le prove nei punti e nei modi descritti nella sezione 4.3.3 si ottengono i risultati mostrati in tabella 4.3. Nella tabella i risultati sono distinti sia rispetto alla guida a cui si riferiscono, G1, G2, G3, sia rispetto al punto da cui è imposto il moto tra i sei ispezionati durante la campagna di studio, e infine rispetto al moto specifico imposto. Il valore maggiore di β , fattore dipendente solo dal carico e dal moto imposto, è di 2797 ottenuto nel punto 5 con un moto lungo z . In tabella per ogni punto e moto viene mostrato solo il valore di β più elevato tra le tre guide. Il valore massimo di velocità angolare ottenuto è di $31.42[\text{rad/s}]$ pari a poco meno di $300[\text{rpm}]$. Facendo riferimento al caso più sfavorevole si procede a scegliere il gruppo motoriduttore.

Per la scelta del motore si decide di fare riferimento alla casa *Mitsubishi Electric* e nello specifico ai motori brushless AC general purpose. In tabella 4.4 sono elencati i motori delle varie serie ispezionati con i dati principali necessari per la loro valutazione. I dati delle inerzie sono relativi ai motori dotati di freno elettromagnetico. Il numero associato al motore serve a ritrovarne i valori nei grafici dei risultati, grafico 4.5 e 4.6. In questi due grafici sono valutati per i diversi motori il valore di α rispetto al valor β_{max} ottenuto dalle simulazioni in Adams, e il range τ_{max} e τ_{min} rispetto a τ_p . Sono utilizzati i valori di $C_{r,rms}^*$ e $\dot{\omega}_{r,rms}$ relativi sempre alla medesima simulazione dalla quale è preso β_{max} . Quello che si può notare è che quasi tutta la gamma di motori è in grado di svolgere il lavoro richiesto. Avendo una diversa possibilità di scelta si è proseguito seguendo due logiche base:

- motore dalla taglia piccola
- motore della classe più idonea

Dovendo svolgere un determinato lavoro si vuole un motore di taglia piccola in grado di soddisfare le esigenze richieste. Un motore di taglia eccessivamente grossa sarebbe inutilmente sovradimensionato e avrebbe dei costi superiori che vanno evitati ove possibile. Questo logica porta a escludere i motori dal numero 11 al 25, che hanno una potenza minima di $0.5[\text{KW}]$ di poco inferiori alla massima potenza nominale dei primi dieci motori. Le classi HG-MR e HG-KR sono molto simili, la differenza risiede nella potenza massima erogabile dai motori, maggiore nella serie HG-KR a fronte di un'inerzia più alta. Non essendo le prestazioni dinamiche molto spinte si preferisce privilegiare la classe HG-KR in modo da poter meglio far fronte a carichi di punta. Alla fine facendo sempre riferimento al grafico 4.6, ed escludendo i motori 6 e 7 che non soddisfano la verifica effettuata, si sceglie il motore numero 9 con un fattore di riduzione pari a 0.1. In tabella 4.2 sono elencati i dati principali del motore scelto. Per il riduttore ci si affida alla casa *Bonfiglioli* di cui alcuni dati tecnici sono elencati sempre in tabella 4.2. Si tratta di un riduttore epicicloidale mono stadio a gioco ridotto, la notazione in tabella fa riferimento alla notazione usata dalla Bonfiglioli e sono indicati momento medio e massimo ammessi in uscita al riduttore, velocità media in entrata, inerzia, rapporto di riduzione e rendimento.

Al fine di garantire il funzionamento motore riduttore viene svolta un'ultima simulazione in Adams in cui sono introdotti i valori dell'inerzia del riduttore e il suo

Tabella 4.2: Motore Mitsubishi HG-KR 43(B), riduttore Bonfiglioli TR 080 1_10

$C_n[Nm]$	$C_{max}[Nm]$	$\omega_n[r/min]$	$\omega_{max}[r/min]$	$J_m[Kgm^2 * 10^{-4}]$	$P_n[Kw]$
1.3	4.5	3000	6000	0.393	0.4
$M_{n2}[Nm]$	$M_{a2}[Nm]$	$n_1[min^{-1}]$	$J_{rid}[Kgm^2 * 10^{-4}]$	τ	η_{rid}
40	80	6000	0.29	0.1	97%

rendimento andando a verificare la disequazione 4.5 e il rispetto del limite sulla coppia massima.

$$C_r^*(t) = \frac{F_N(t)d_p}{2\eta_s} + J_{rid}\dot{\omega}_r \quad \alpha = \frac{(C_n\eta_{rid})^2}{J_m} \quad (4.15)$$

$$\alpha = 40461.1 > 2798 + \left[7.24 \frac{0.1}{\sqrt{0.393 * 10^{-4}}} - 138.88 \frac{\sqrt{0.393 * 10^{-4}}}{0.1}\right]^2 \quad (4.16)$$

La disequazione risulta verificata e la coppia massima richiesta, 10.68[Nm] lato riduttore, rientra nei limiti del motore. Il gruppo motoriduttore scelto risulta idoneo.

4.4 Scelta delle Guide Lineari

Il moto del *Linear Delta* è controllato attraverso lo spostamento di 3 slider liberi di scorrere su delle guide lineari messe in azione dai gruppi motoriduttori scelti durante lo studio dinamico. Due soluzioni tipiche di guide lineari sono:

1. trasmissione a cinghia dentata
2. trasmissione a vite senza fine a ricircolo di sfere

Le guide a cinghia dentata presentano generalmente costi e fabbisogni energetici minori a fronte di prestazioni peggiori rispetto alle guide a vite senza fine in termini di forza, rigidità e precisione. La richiesta di prestazioni dinamiche non spinte in termine di accelerazioni come visto dallo studio dinamico favorisce la scelta della più economica guida lineare a cinghia dentata.

Per la scelta della guida lineare si fa riferimento alla casa *Rollon* che mette a disposizione due tipi di guide lineari a cinghia dentata:

Serie SP con guida a ricircolo di sfere Lo slider è montato su due carrelli a ricircolo di sfere precaricati messi in azione dalla cinghia.

Serie CL con guida a rotella ad arco gotico Lo slider è dotato di quattro rotelle a due corone di sfere a contatto obliquo, con profilo esterno ad arco gotico che consente uno scorrimento su delle barre di acciaio

In figura 4.7 sono visibili due sezioni di due guide Rollon, una della serie SP e una della serie CL. Per la scelta della guida è fondamentale la verifica delle velocità e delle

Tabella 4.3: Risultati di coppia, accelerazione, velocità e β_{max}

	$C_{r,rms}^*[Nm]$	$\dot{\omega}_{r,rms}[rad/s^2]$	$(C_r^*\dot{\omega}_r)_{medio}[Nm/s^2]$	$\omega_{r,max}[rad/s]$	β_{max}	
G1	6.28	85.05	357.13	18.06	1782.5	Moto lungo x
G2	4.12	54.37	100.57	10.72		Punto 1
G3	4.12	54.37	100.57	10.72		
G1	3.1	39.62	14.5	4.42	1399.1	Moto lungo y
G2	5.65	75.82	271.16	16.01		Punto 1
G3	5.65	75.82	271.16	16.01		
G1	3.59	138.88	195.46	31.42	1388.1	Moto lungo z
G2	3.59	138.88	195.46	31.42		Punto 1
G3	3.59	138.88	195.46	31.42		
G1	5.1	36.46	-21.31	4.04	1657.9	Moto lungo y
G2	5.19	88.13	371.58	18.34		Punto 2
G3	5.19	88.13	371.58	18.34		
G1	6.42	138.88	348.43	31.42	2480.1	Moto lungo z
G2	2.19	138.88	118.97	31.42		Punto 2
G3	2.19	138.88	118.97	31.42		
G1	1.07	49.45	8.83	5.48	1519.2	Moto lungo y
G2	6.48	73.6	282.68	15.54		Punto 6
G3	6.48	73.6	282.68	15.54		
G1	1.12	138.88	60.56	31.42	1870.2	Moto lungo z
G2	4.84	138.88	262.91	31.42		Punto 6
G3	4.84	138.88	262.91	31.42		
G1	5.98	89.49	354.2	18.93	1780.5	Moto lungo x
G2	5.86	50.24	109.18	9.92		Punto 4
G3	2.53	67.24	92.38	13.18		
G1	3.44	138.88	186.8	31.42	2307.1	Moto lungo z
G2	5.97	138.88	324.43	31.42		Punto 4
G3	1.38	138.88	75.14	31.42		
G1	6.03	138.88	327.29	31.42	2329.5	Moto lungo z
G2	4.21	138.88	228.69	31.42		Punto 3
G3	0.56	138.88	30.4	31.42		
G1	1.14	138.88	61.95	31.42	2797	Moto lungo z
G2	7.24	138.88	393.01	31.42		Punto 5
G3	2.42	138.88	131.43	31.42		

Tabella 4.4: Motori Brushless Mitsubishi Electric

Serie Motore	$C_n[Nm]$	$C_{max}[Nm]$	$\omega_{max}[r/min]$	$J_m[Kgm^2 * 10^{-4}]$	$P_n[KW]$	Numero
HG-MR	0.16	0.48	6000	0.0224	0.05	1
	0.32	0.95	6000	0.0362	0.1	2
	0.64	1.9	6000	0.109	0.2	3
	1.3	3.8	6000	0.164	0.4	4
	2.4	7.2	6000	0.694	0.75	5
HG-KR	0.16	0.56	6000	0.0472	0.05	6
	0.32	1.1	6000	0.0837	0.1	7
	0.64	2.2	6000	0.243	0.2	8
	1.3	4.5	6000	0.393	0.4	9
	2.4	8.4	6000	1.37	0.75	10
HG-SR	2.4	7.2	3000	9.48	0.5	11
	4.8	14.3	3000	13.8	1.0	12
	7.2	21.5	3000	18.2	1.5	13
	9.5	28.6	3000	56.5	2.0	14
	16.7	50.1	3000	88.2	3.5	15
HG-RR	3.2	8.0	4500	1.85	1.0	16
	4.8	11.9	4500	2.25	1.5	17
	6.4	15.9	4500	2.65	2.0	18
	11.1	27.9	4500	11.8	3.5	19
	15.9	39.8	4500	15.5	5.0	20
HG-JR	1.6	4.8	6000	1.85	0.5	21
	2.4	7.2	6000	2.25	0.75	22
	3.2	9.6	6000	2.65	1.0	23
	4.8	14.3	6000	11.8	1.5	24
	6.4	19.1	6000	15.5	2.0	25

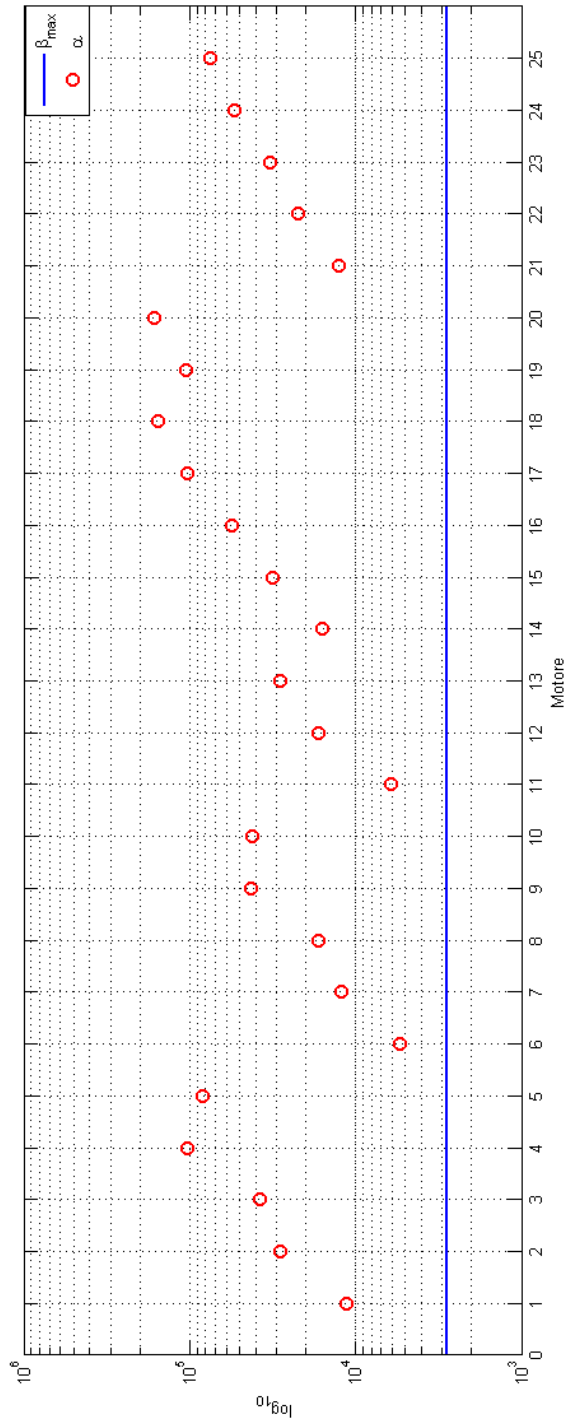


Figura 4.5: α per i diversi motori rispetto a β_{max}

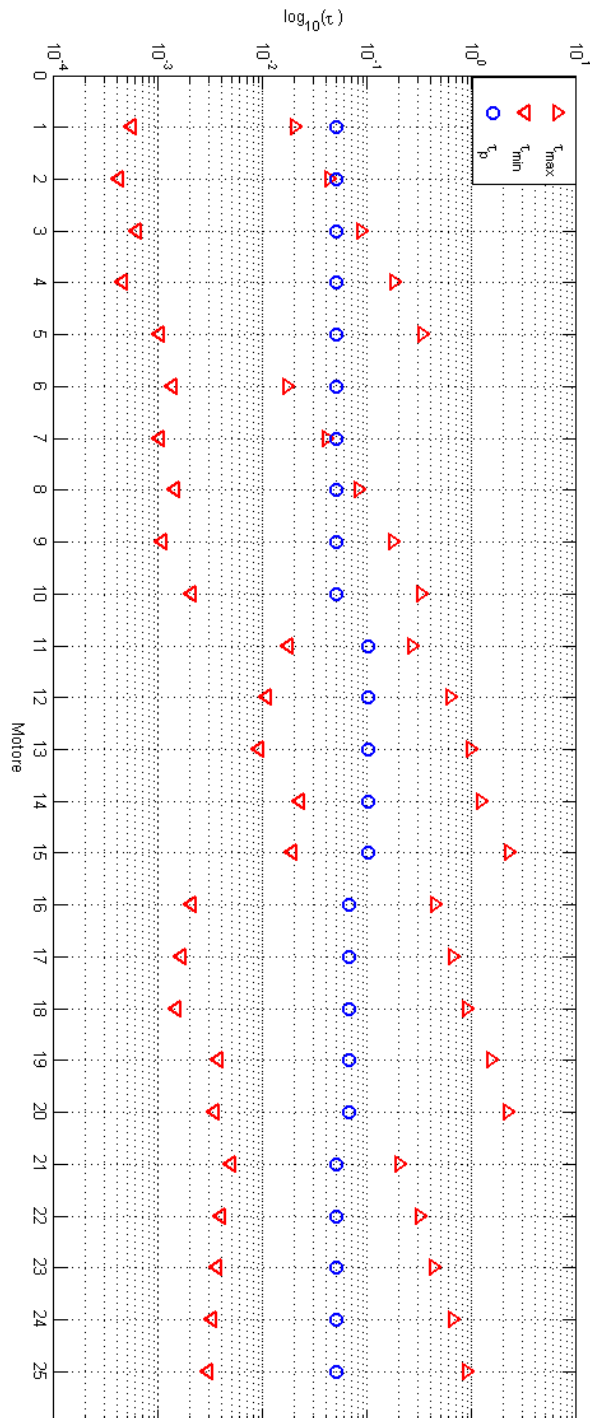


Figura 4.6: Rapporti di trasmissione possibili per i diversi motori

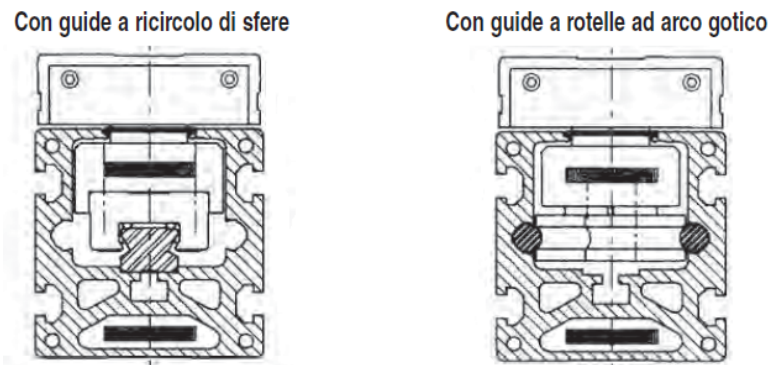


Figura 4.7: Guide Rollon Serie SP e CL

accelerazioni massime ammissibili, dei carichi sopportabili, e si deve valutare la corsa da garantire agli slider.

Per quanto riguarda la corsa degli slider questa può facilmente essere ricavata attraverso l'uso della cinematica inversa. Facendo riferimento allo spazio di lavoro effettivo del *Linear Delta* in figura 3.15 si ottiene che ad ogni slider deve essere garantito uno spostamento complessivo di $197[mm]$ di cui 139 verso l'alto rispetto alla posizione dello slider con piattaforma centrata. A questa corsa, che garantisce uno spostamento del *Linear Delta* nel piano, va aggiunta una corsa necessaria a garantire lo spostamento della piattaforma lungo l'asse z . Facendo riferimento ai dati di tabella 3.1 si aggiunge una corsa di $187[mm]$. La corsa massima da garantire agli slider è di $384[mm]$. La scelta finale è però fortemente influenzata da una precisa scelta progettuale. Facendo riferimento alla figura 4.8a si è scelto di avere delle guide che contengano in altezza la struttura del *Linear Delta*. Questo permette in fase di progettazione di usare le guide non solo per fini cinematici ma anche per fini strutturali. Le guide hanno il compito di sorreggere l'estrusore della stampante e garantire una soluzione ergonomica. In figura 4.9 si ha una rappresentazione della stampante. L'altezza complessiva della struttura fa sì che il *Linear Delta* si trovi a lavorare ad un'altezza poco inferiore a $1.5[m]$, in questo modo l'operatore che si trova a lavorare sulla macchina può facilmente osservare il lavoro in esecuzione e alla fine estrarre l'oggetto stampato. Considerando l'ingombro in altezza del *Linear Delta* si stabilisce una corsa utile per gli slider di $1000[mm]$ in modo da ottenere una lunghezza complessiva delle guide di $1540[mm]$.

Per quanto riguarda accelerazioni e velocità massime i valori ricavati dalle simulazioni dinamiche effettuate valgono rispettivamente $5910[mm/s^2]$ e $942.5[mm/s]$. I valori di forze e momenti scaricati sulla guida sono stati misurati durante la campagna di prove sui 3 vincoli di traslazione degli slider. I valori critici per la scelta della guida sono i momenti ed in particolar modo il momento M_z , che è la causa del possibile distacco dello slider dalla guida e presenta sempre il valore più basso tra i valori limite della guida. In figura 4.8b sono mostrati momenti e forze agenti sugli slider. Durante le prove dinamiche effettuate è stata eseguita una campagna di misure in alcuni punti chiave della struttura al fine di rilevare forze e momenti fondamentali per la progettazione della struttura. In figura 4.4 sono definiti questi punti relativi a tre vincoli del sistema; il vincolo di traslazione dello slider, T, e i revolte tra perno e slider e link e perno, S1, S2 ed S3. Per la scelta della guida sono stati valutati i momenti generati durante le simulazioni nei punti T di tutti e tre gli slider. In tabella 4.6 sono mostrati i risultati

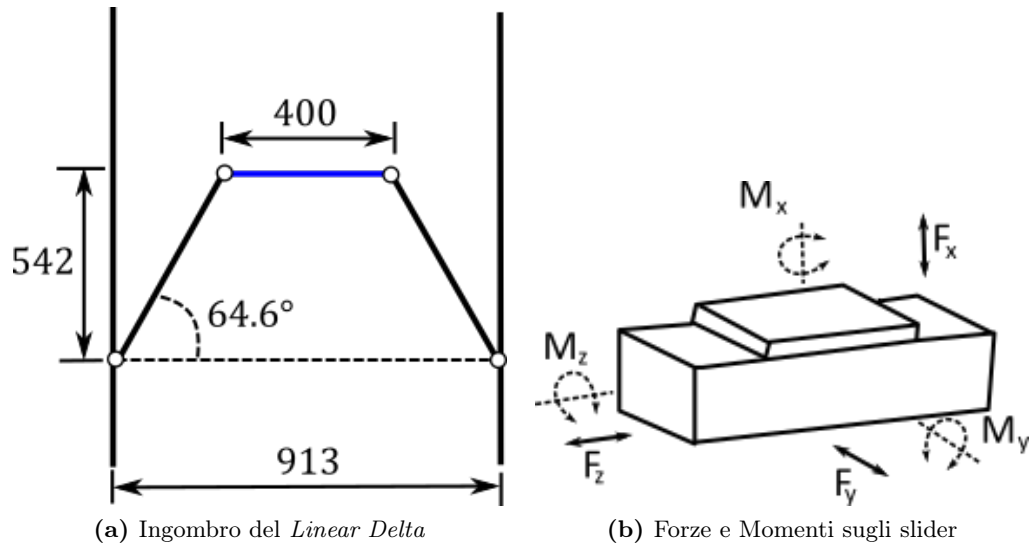


Figura 4.8: Ingombro del *Linear Delta* e forze e momenti sugli slider

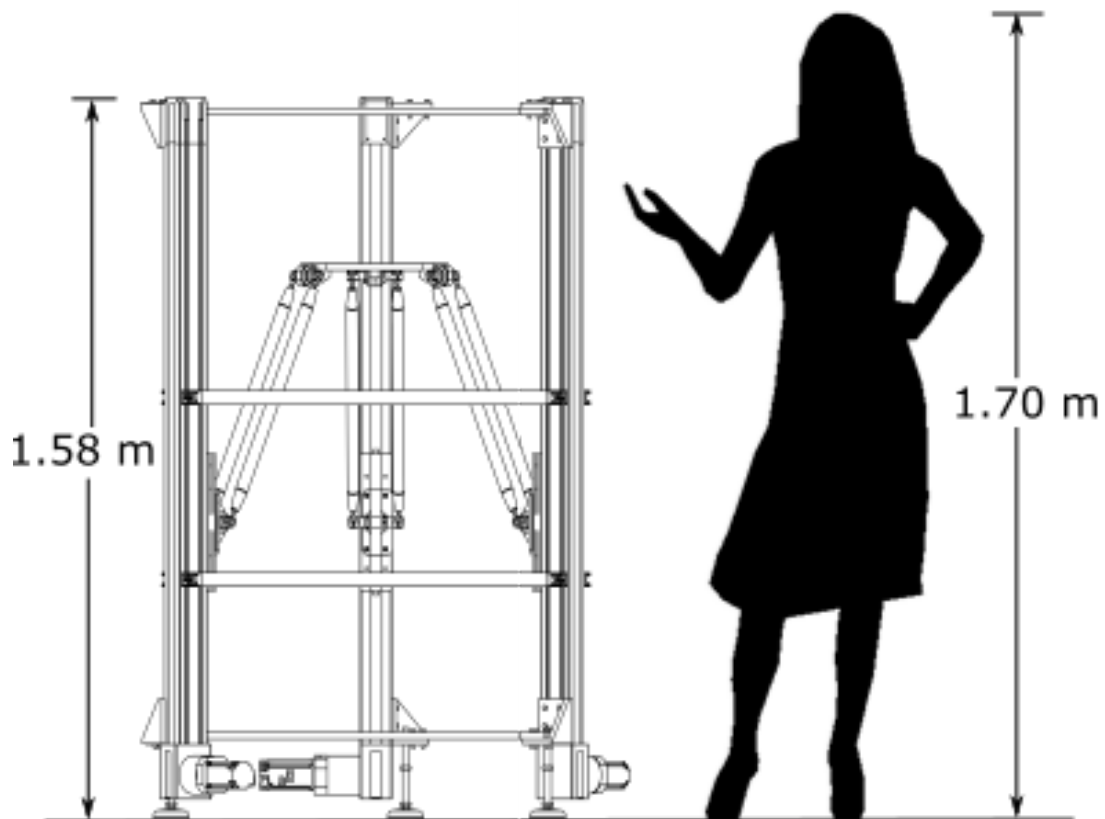


Figura 4.9: Soluzione Ergonomica

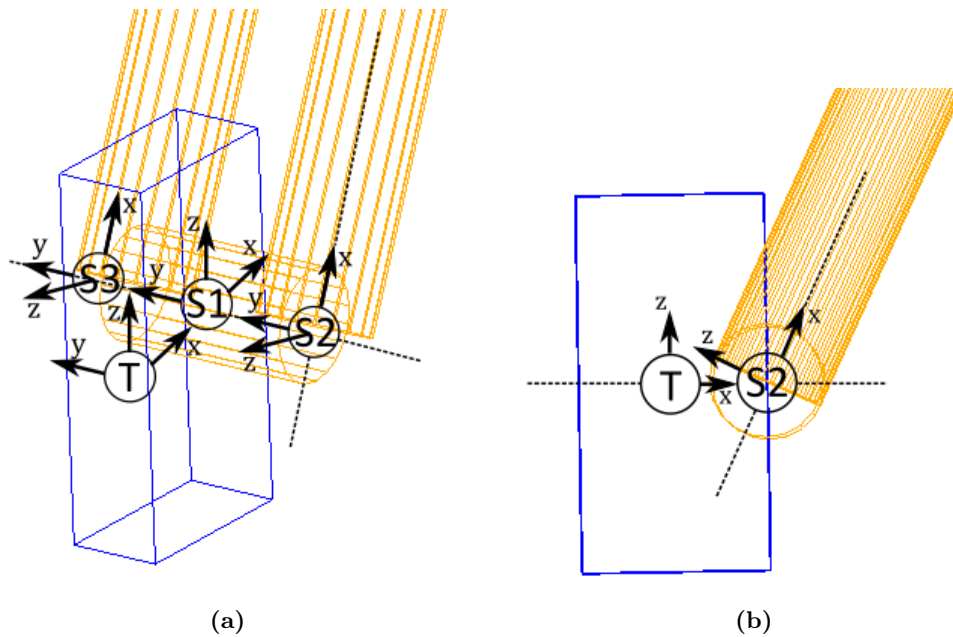


Figura 4.10: Punti per lo studio delle reazioni vincolari

Tabella 4.5: Guida Rollon ELM 80 SP, carichi dinamici massimi consigliati

$v_{max}[m/s]$	$a_{max}[m/s^2]$	$F_x[N]$	$F_y[N]$	$M_x[Nm]$	$M_y[Nm]$	$M_z[Nm]$	$d_p[mm]$
5	50	4180	4180	300	300	58	60

ottenuti. I momenti massimi rilevati sono:

$$M_x = 48.3[Nm] \quad M_y = 24.7[Nm] \quad M_z = 38.2[Nm] \quad (4.17)$$

Visti i dati ottenuti si è scelta la guida Rollon ELM 80 SP i cui dati principali sono riportati in tabella 4.5, dove si fa riferimento ai valori consigliati per carichi dinamici ed è riportato il valore del diametro della puleggia d_p .

4.5 Risultati Studio Dinamico

Alla fine di questo capitolo dopo la scelta del gruppo motoriduttore e delle guide lineare si vogliono mostrare i risultati ottenuti in altri punti della macchina e che sono utilizzati nella fase di progettazione. Per i punti di interesse si faccia riferimento alla già citata figura 4.10. Di seguito si mostrano i risultati ottenuti nei punti S1, S2 ed S3. Nel punto S1 sono valutate la forza trasversale al perno, F_t , la forza assiale F_a , e la coppia complessiva esercitata dal vincolo C_p ; nel punto S2 ed S3 sono valutate le forze espresse nelle 3 direzioni x , y e z ; è oggetto di misura anche la velocità angolare del perno ω_p . In tabella 4.7 sono mostrati i valori massimi ottenuti. Nella tabella i termini G1, G2 e G3 stanno ad indicare come le misure sono state prese su tutti e tre i parallelogrammi relativi alla guida 1, 2 e 3. Per i valori di forza ottenuti su S1 ed S3 viene indicato solamente il massimo tra i due di volta in volta, F_x , F_y ed F_z .

Tabella 4.6: Forze e momenti sulle guide

	$M_x[Nm]$	$M_y[Nm]$	$M_z[Nm]$	$F_x[N]$	$F_y[N]$	
G1	0	14.4	0	119.5	0	Moto lungo x
G2	37.6	8.1	25.1	51.11	35	Punto 1
G3	37.6	8.1	25.1	51.11	35	
G1	42.6	3.5	21.6	28.9	12.2	Moto lungo y
G2	20.6	12.6	16.6	93.7	30.7	Punto 1
G3	20.6	12.6	16.6	93.7	30.7	
G1	0	5.5	0	46	0	Moto lungo z
G2	0	5.5	0	46	0	Punto 1
G3	0	5.5	0	46	0	
G1	48.3	7.2	12.6	25.4	22.5	Moto lungo y
G2	21.6	24.7	22.1	124.8	95	Punto 2
G3	21.6	24.7	22.1	124.8	95	
G1	0	17.8	0	40.2	0	Moto lungo z
G2	20.2	6	15.3	24	9.4	Punto 2
G3	20.2	6	15.3	24	9.4	
G1	39.1	0	38.2	7.3	3.3	Moto lungo y
G2	33.5	15.4	22.7	61.9	40.6	Punto 6
G3	33.5	15.4	22.7	61.9	40.6	
G1	0	1.7	0	11.7	0	Moto lungo z
G2	13.7	15.7	8	49.7	35.5	Punto 6
G3	13.7	15.7	8	49.7	35.5	
G1	16.5	16	10.9	119.3	68.7	Moto lungo x
G2	44.9	11.3	17.1	29	18.6	Punto 4
G3	39.7	5.8	29.1	87.4	37.3	
G1	20.7	11.8	13.4	44.1	25.9	Moto lungo z
G2	6	17.4	3.3	44.4	26.1	Punto 4
G3	11.8	0.5	10.1	0.5	0	
G1	10.3	16.6	5.8	38.3	53.7	Moto lungo z
G2	23	14	14	47.7	48.3	Punto 3
G3	7.8	8	8.3	45.4	5.4	
G1	22.9	1.6	21.6	11.4	4.2	Moto lungo z
G2	2.7	17	1.6	22.6	23.8	Punto 5
G3	30.5	7.4	23.2	29.9	19.6	

Tabella 4.7: Risultati dello studio dinamico nei punti S1, S2 ed S3 dei 3 parallelogrammi

	$F_t[N]$	$F_a[N]$	$C_p[Nm]$	$\omega_p[deg/s]$	$F_x[N]$	$F_y[N]$	$F_z[N]$	
G1	291.7	0	0	144.2	112	0	2	Moto lungo x
G2	170.6	35	45.6	51	453.9	1	2	Punto 1
G3	170.6	35	45.6	51	453.9	1	2	
G1	76.2	12.2	47.5	5.5	474.4	1.2	1.3	Moto lungo y
G2	257.6	30.7	27	87	318.6	0.7	1.8	Punto 1
G3	257.6	30.7	27	87	318.6	0.7	1.8	
G1	119.7	0	0	0	57.7	0	2	Moto lungo z
G2	119.7	0	0	0	57.7	0	2	Punto 1
G3	119.7	0	0	0	57.7	0	2	
G1	145.9	22.5	50	19.5	516.3	1.5	1	Moto lungo y
G2	308.7	95	28.9	90.2	343.3	1.4	2.5	Punto 2
G3	308.7	95	28.9	90.2	343.3	1.4	2.5	
G1	238.6	0	0	0	117	0	0.8	Moto lungo z
G2	53.8	9.4	26.2	0	269.1	0.77	2.5	Punto 2
G3	53.8	9.4	26.2	0	269.1	0.77	2.5	
G1	7.5	3.3	54.8	11	513.6	1	2	Moto lungo y
G2	290.3	40.6	44.4	88.5	482.7	1	1.5	Punto 6
G3	290.3	40.6	44.4	88.5	482.7	1	1.5	
G1	11.8	0	0	0	5.5	0	2.9	Moto lungo z
G2	172.8	35.5	20	0	272.5	1	1.3	Punto 6
G3	172.8	35.5	20	0	272.5	1	1.3	
G1	275.4	68.7	19.8	104	252.6	1	2	Moto lungo x
G2	222.5	18.6	48.4	88.5	471.6	1	1	Punto 4
G3	112.6	37.3	48.4	88.5	526.3	1	2	
G1	112.6	25.9	27.4	0	313.2	1	2	Moto lungo z
G2	220.1	26.1	9.6	0	196.3	1	2	Punto 4
G3	12.5	0	15.5	0	144.9	0.5	3	
G1	221.3	53.7	16.7	0	268.1	1	1	Moto lungo z
G2	145.6	48.3	32.4	0	387.5	1	1.5	Punto 3
G3	51.3	5.4	11	0	127.5	3.5	3.5	
G1	11.5	4.2	31.2	0	298.3	1	3	Moto lungo z
G2	272.4	23.8	4.2	0	172.9	0.5	0.5	Punto 5
G3	66.5	16	27.8	0	420.7	1	2.5	

Capitolo 5

Progettazione

5.1 Introduzione

In questo capitolo viene mostrata la fase di progettazione costruttiva di dettaglio del *Linear Delta* insieme a quella che è la struttura complessiva della stampante 3D. Viene inoltre descritto il sistema di controllo della macchina con il relativo schema elettrico. Si vuole far osservare al lettore come la progettazione di una macchina è un procedimento ricorsivo ed il lavoro svolto in questo capitolo non è separato da quello svolto nell'ottimizzazione cinematica e nell'analisi dinamica come ricordato nelle rispettive introduzioni delle stesse. I procedimenti qui svolti sono stati sviluppati attraverso l'uso del software *SolidWorks*. In allegato sono disponibili i disegni tecnici dei componenti progettati e le schede tecniche dei principali componenti acquistati.

5.2 Progetto Stampante Efesto

In figura 5.1 è visibile una rappresentazione della stampante Efesto. La struttura, insieme del *Linear Delta* e dell'*Agile Eye*, non è completamente definita nei suoi particolari costruttivi. In questo lavoro di tesi si è andati a progettare in dettaglio la struttura del *Linear Delta* ed a fare una sintesi cinematica ed uno studio di fattibilità dell'*Agile Eye* necessari per garantire l'integrabilità del secondo con il primo. Nella figura si può notare come il robot con 5 gdl è completamente rinchiuso all'interno di una struttura definita dalle 3 guide lineari e da due piastre. Il compito di queste ultime è:

1. garantire la precisione nel posizionamento delle guide
2. irrigidire la struttura
3. servire da supporto per l'estrusore

Il corretto funzionamento del *Linear Delta* da un punto di vista cinematico è tanto più garantito quanto più si raggiunge un alto grado di precisione nella costruzione del robot. La costruzione delle due piastre serve a garantire un posizionamento delle tre guide come definito in fase di ottimizzazione cinematica. L'irrigidimento della struttura è teso a limitare le deformazioni delle guide e quindi a minimizzare gli errori di posizionamento. Sempre in questo senso sono previsti 6 tiranti laterali, due tra una guida e l'altra, con il medesimo scopo. Per rendere più compatta la stampante si è deciso

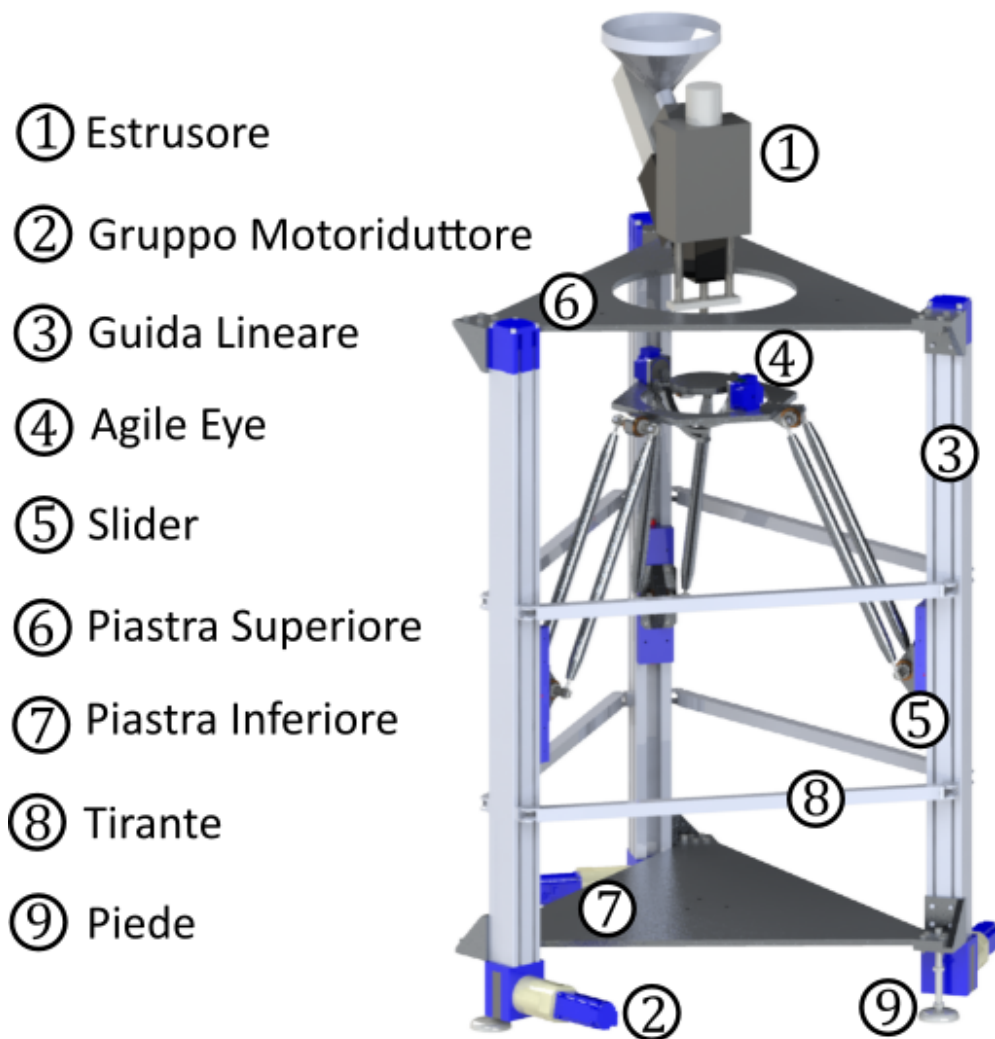


Figura 5.1: Stampante Efesto

di utilizzare le guide lineari per sorreggere l'estrusore che va a depositare il materiale della stampante evitando di costruire una struttura di supporto apposta. La piastra superiore deve garantire il posizionamento dell'estrusore e trasmettere i carichi derivanti dall'estrusore stesso alle 3 guide. La disposizione a 120° delle guide permette l'equa ripartizione dei carichi derivanti dall'estrusore. Alla base delle guide lineari si ritrovano i tre gruppi motoriduttori scelti durante lo studio dinamico. Tutta la stampante poggia su 3 piedi snodabili.

5.3 Linear Delta

Durante la fase di progettazione viene definito il *Linear Delta* in ogni suo particolare costruttivo facendo riferimento ai dati ottenuti in fase di ottimizzazione cinematica e studio dinamico. Dalla prima sono presi i valori di lunghezza dei link, l , grandezza della

Tabella 5.1: Alluminio Anticorodal 6012

σ_R [MPa]	$\sigma_{Rp0,2}$ [MPa]	E [GPa]	$A\%$ ¹	ρ [g/cm ³]	HB ²	T_f [°C]
350	320	69	10	2,75	105	580-650

¹ Provette tonde con diametro tratto utile di 12,5 mm;

² Sfera da 10 mm con carico 500 kg applicato per 30 secondi;

piattaforma mobile, d , e posizionamento delle guide tramite α e D , mentre dalla seconda i valori di forza e coppie massime. La progettazione dei vari componenti è effettuata garantendo il non raggiungimento dei carichi di snervamento del materiale e verificando l'ottenimento di bassi sforzi, essenziale per ottenere basse deformazioni e minimizzare gli errori di posizionamento. Queste verifiche sono effettuate sui pezzi costruiti internamente al laboratorio del dipartimento di meccanica del politecnico, mentre per le parti acquistate si fa riferimento ai valori di carico massimo disponibili sulle schede tecniche dei singoli componenti.

5.3.1 Materiale

Per la costruzione dei pezzi progettati si sceglie l'utilizzo della lega di Alluminio 6012, commercialmente chiamata *Anticorodal*. La scelta di questo materiale è dettata da:

- leggerezza
- bassi carichi da sopportare
- resistenza alla corrosione

La struttura del *Linear Delta* si vuole sia la più leggera possibile; peso aggiuntivo andrebbe a gravare sui motori limitando le prestazioni dinamiche del sistema o il carico trasportabile. L'alluminio con la sua bassa densità, 2.7 [g/cm³], è ideale per tale scopo. I carichi ottenuti in fase di studio dinamico non sono molto elevati e la scelta dell'alluminio consente di avere basse deformazioni senza avere pezzi dalle dimensioni eccessive. L'uso dell'alluminio evita problemi di corrosione senza dover ricorrere a continue pulizie dei pezzi, sostituzione dei pezzi o utilizzo di acciai inossidabili, più costosi e molto più pesanti. In tabella 5.1 sono riportate le caratteristiche tecniche del materiale.

5.3.2 Link

Facendo riferimento alla figura 5.2 si possono notare le tre parti che compongono la struttura definita link. Si ha un tubo centrale con all'estremità due tappi il cui compito è garantire l'inserimento di due snodi sferici. Gli snodi servono a garantire quel grado di mobilità che in fase di studio cinematico è definito come α_2 . I tappi sono forati e filettati in modo da garantire l'inserimento degli snodi. Il collegamento tra tappo e tubo è eseguito tramite l'utilizzo di colla cianoacrilica. I link, assimilabili a delle bielle, durante lo studio dinamico hanno dimostrato di lavorare quasi esclusivamente a trazione o compressione. In tabella 4.7 si nota come le forze esercitate dai vincoli S2 ed S3 sono principalmente lungo x , asse del link, e quasi nulle nelle altre due direzioni. Questo risultato è quello che ci si attendeva dato l'utilizzo degli snodi sferici. L'unico vincolo da rispettare nella progettazione del tubo è che la sezione minima riesca a reggere il

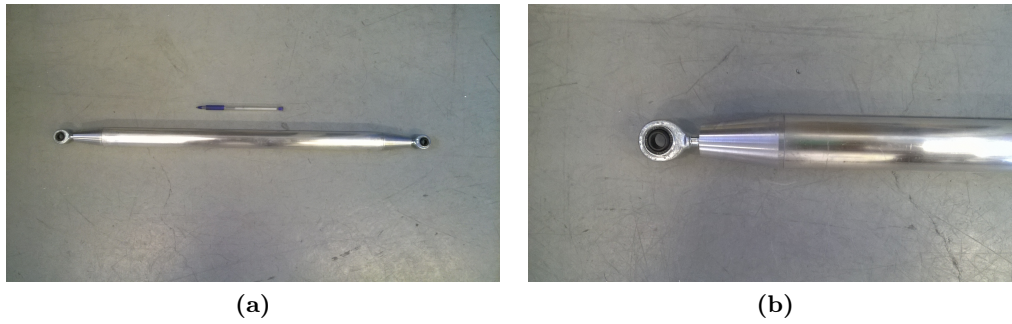


Figura 5.2: Link

massimo carico senza che si ottengano elevate deformazioni. Il valore massimo rilevato durante lo studio dinamico è:

$$F_{x,max} = 526.3[N] \quad (5.1)$$

La minima area del link, A_m , considerando lo snervamento del materiale, σ_s , è:

$$\frac{F_{x,max}}{A_m} = \sigma_s \quad A_m = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2) \quad A_m = 1.64[mm^2] \quad (5.2)$$

Dove per D e d si è inteso il diametro esterno ed interno del tubo. L'area minima risulta essere molto piccola per via del basso carico. La scelta della soluzione a tubo del link è servita in fase progettuale a garantire una forma che fosse in grado di ospitare lo snodo sferico e a limitare il peso del link stesso. Alla fine il tubo centrale è stato progettato con un diametro di 30[mm] ed uno spessore di 3,5[mm]. La sezione generata è ben oltre quella minima. Lo spessore finale elevato è stato dettato da esigenze e vincoli legate all'approvvigionamento dei semilavorati, in ogni caso un tale spessore garantisce sforzi minimi all'interno del link e conseguentemente basse deformazioni. L'allungamento totale massimo del link, $\delta L_{x,max}$ è:

$$\epsilon_{x,max} = \frac{\sigma_x}{E} = 0.258 \cdot 10^{-4} \quad \delta L_{x,max} = L \cdot \epsilon_{x,max} = 0.015[mm] \quad (5.3)$$

Tale aspetto è molto importante, infatti come si vedrà nel seguito del testo il sistema di controllo del *Linear Delta* si basa sulla posizione dei motori o sulla misura diretta della posizione degli slider; questo rende la macchina cieca per tutto ciò che avviene oltre. Una deformazione dei link si traduce in un errore di posizionamento della piattaforma non rilevabile ed è quindi buona cosa minimizzare tali deformazioni. Si deve comunque sottolineare come un incremento di spessore del tubo porta ad un aumento di massa dei link; non conviene aumentare eccessivamente lo spessore. La verifica dell'area va fatta anche sui due tappi del link; le misure dei tappi derivano dalla necessità di accomodare la loro forma da un lato con il tubo e dall'altra con lo snodo sferico. Anche qui la verifica agli sforzi è ampiamente verificata.

Lo snodo sferico è stato selezionato dal catalogo SKF "spherical plain bearings and rod ends", nello specifico lo snodo SA 8 E le cui principali caratteristiche necessarie per la scelta tecnica sono riportate in tabella 5.2. Il coefficiente μ_{max} fa riferimento al massimo attrito del cuscinetto radente interno allo snodo; l'angolo di rollio è la

Tabella 5.2: Snodo Sferico SKF SA8E

Angolo di rollio[deg]	Coefficiente di carico[kN]		Coefficiente attrito
	statico	dinamico	
α	C_0	C	μ_{max}
15	12.9	5.5	0.2

metà della mobilità concessa allo snodo intorno al cuscinetto stesso. Le prove per la verifica dello snodo sono due, una statica e l'altra dinamica. Per tutte e due si usano le indicazioni e formule del catalogo SKF. Per la verifica statica deve valere:

$$P_{perm} = C_0 b_2 b_6 \quad F_a < 0.1 C_0 \quad b_6 = 0.5 \quad b_2 = 1 \quad (5.4)$$

I coefficienti b_6 e b_2 tengono conto rispettivamente del tipo di carico, in questo caso alternato, e della temperatura di esercizio. La forza F_a è la forza assiale del cuscinetto interno allo snodo sferico. In questo caso il cuscinetto è soggetto a una forza quasi puramente radiale, le piccole forze assiali misurate nello studio dinamico vengono considerate nulle. Risulta un carico permissibile, P_{perm} , di $6.25[kN]$, ben oltre quanto necessario. La verifica dinamica deve invece rispettare:

$$\frac{C}{P} > 1.25 \quad P = y F_r \quad (5.5)$$

Dove P è il carico dinamico equivalente dipendente dal carico radiale al cuscinetto, F_r , e da un coefficiente y funzione del rapporto tra carico radiale ed assiale. Anche questa verifica risulta soddisfatta. La verifica dinamica richiede inoltre che venga controllato le condizioni di lavoro dello snodo considerando una pressione di lavoro effettiva, p , e una velocità di strisciamento tra le parti del cuscinetto, v . Queste possono essere così calcolate:

$$p = K \frac{P}{C} \quad v = 5.82 \cdot 10^{-7} d_k \frac{4\beta}{t} \quad \beta = 14.4^\circ \quad t = 1[s] \quad d_k = 10[mm] \quad K = 50[N/mm^2] \quad (5.6)$$

Dove β è il mezzo angolo di oscillazione durante il moto e t è il tempo di una oscillazione completa. Sono considerate la massima oscillazione e velocità di strisciamento rilevate dallo studio dinamico. Il termine d_k tiene conto delle dimensioni del cuscinetto mentre il coefficiente K tiene conto del tipo di cuscinetto e superficie di contatto; lo snodo sferico scelto ha un tipo di contatto acciaio/acciaio. Calcolati p e v si usa un grafico pv , figura 5.3, per verificare il campo di applicabilità della soluzione. In questo caso i valori di $p = 4.78[N/mm^2]$ e $v = 0.3 \cdot 10^{-3}[m/s]$ dimostrano come la verifica dinamica è anch'essa soddisfatta.

Si può notare come sia la verifica statica che dinamica sembrano indicare questo pezzo come sovradimensionato rispetto ai carichi rilevati. Nella scelta dello snodo ha prevalso la necessità di combinare le dimensioni geometriche dello snodo con il link e il disegno del vincolo universale.

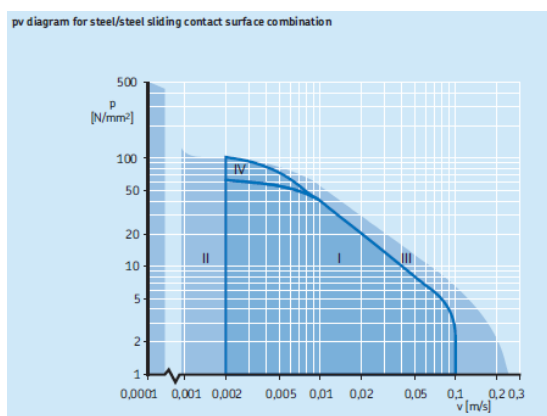


Figura 5.3: Grafico pv

5.3.3 Vincolo Universale

Per la progettazione del *Linear Delta* è cruciale il disegno del vincolo universale che lega i link allo slider e alla piattaforma che deve consentire quelle due rotazioni relative precedentemente chiamate α_1 ed α_2 .

In figura 5.4 e 5.5 sono presentati i due vincoli lato slider e lato piattaforma. I due vincoli come si può vedere dagli esplosi sono identici, cambia ovviamente il supporto che deve legare il vincolo allo slider o alla piattaforma. Facendo riferimento all'esplosi di figura 5.7 si vede come la realizzazione del vincolo universale è raggiunta grazie all'utilizzo di due boccole in bronzo che permettono la rotazione di un perno. Questa rotazione è una delle due rotazioni concesse dal vincolo, ed è quella che è stata denominata α_1 . Si noti come questa rotazione del perno ha come limite il fatto di dover evitare lo scontro dei link e della piattaforma con la guida. Gli snodi sono collegati a delle forcelle ricavate nel perno. Lo snodo è libero di ruotare attorno all'asse del proprio cuscinetto. Questa rotazione relativa tra perno e link è quella che è stata denominata α_2 . In figura 5.8 si vede come questa rotazione sia limitata dal possibile contatto tra un link ed il vincolo stesso. Vista la differente forma dei supporti nel vincolo nel caso slider e nel caso piattaforma questo limite è leggermente diverso. Il valore minimo di rotazione α_2 ottenuto è di poco superiore ai 45° . Nella soluzione costruttiva l'uso delle ghiere serve a serrare il perno in posizione centrata sul supporto. La zona centrale del perno avrà un lunghezza al minimo uguale alla somma delle lunghezze del supporto e della flangia delle due boccole. Questa soluzione facilita il montaggio evitando di serrare le ghiere direttamente sulle boccole, un serraggio eccessivo porterebbe a bloccare il meccanismo o a rovinare molto velocemente le boccole, e allo stesso tempo lascia un gioco minimo al perno evitando un'eccessiva mobilità assiale dello stesso.

Per la scelta delle boccole si è fatto riferimento al catalogo SKF "*Boccole, ralle reggispinta e strisce SKF*", da cui viene scelta la boccia flangiata PBMF 253516 M1G1. In tabella 5.3 ne sono riportati alcuni dati tecnici. Le boccole hanno il compito di portare le coppie e forze radiali al perno che sono state rilevate dalla simulazione dinamica. Le massime forze e coppie misurate sono:

$$F_{t,max} = 308.7[N] \qquad C_{p,max} = 54.8[Nm] \qquad (5.7)$$

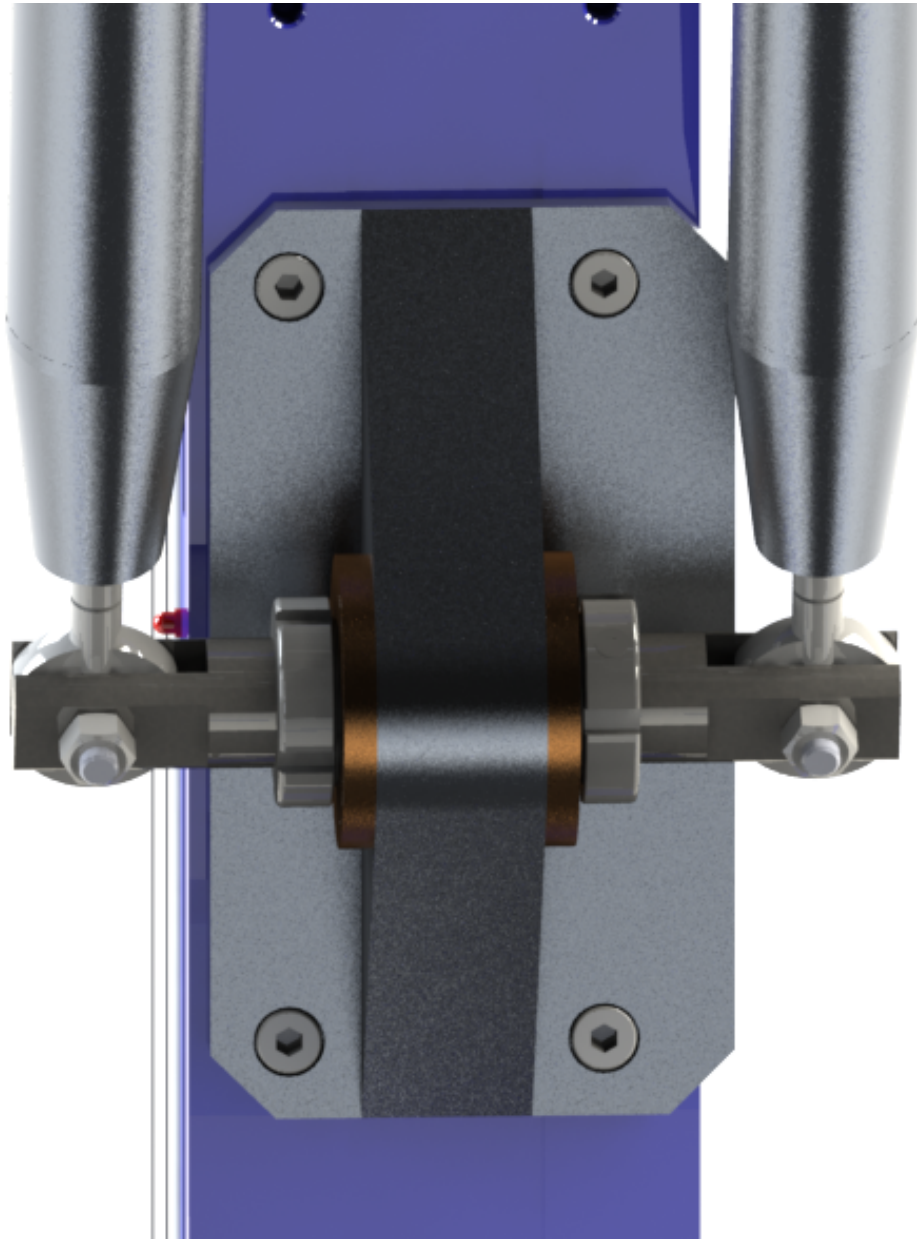


Figura 5.4: Vincolo universale sullo slider

Tabella 5.3: Boccia SKF PBMF 253516 M1G1

Materiale	Carico ammissibile[MPa]		Velocità di strisciamento[m/s] max	μ
	statico	dinamico		
Bronzo massiccio	45	25	0.5	0.15



Figura 5.5: Vincolo universale sulla piattaforma

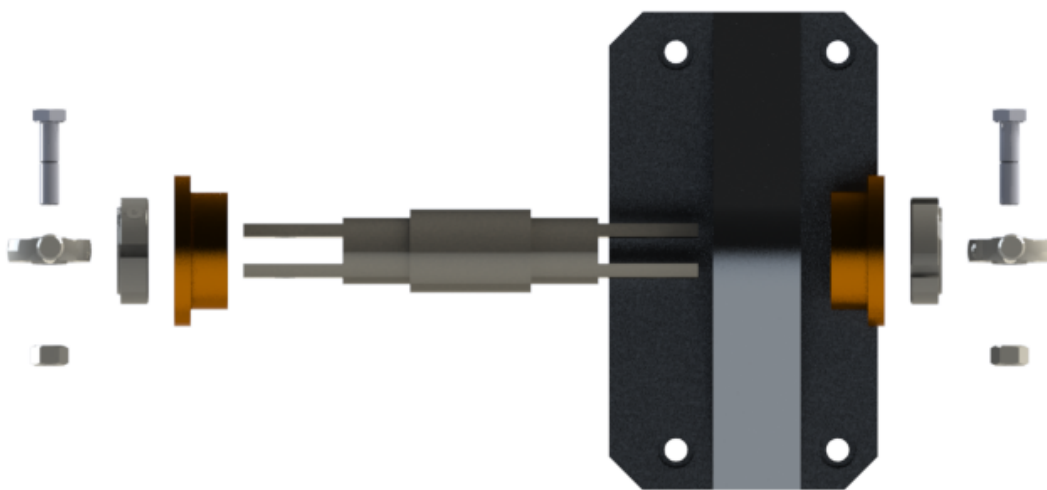


Figura 5.6: Vincolo universale sullo slider esploso

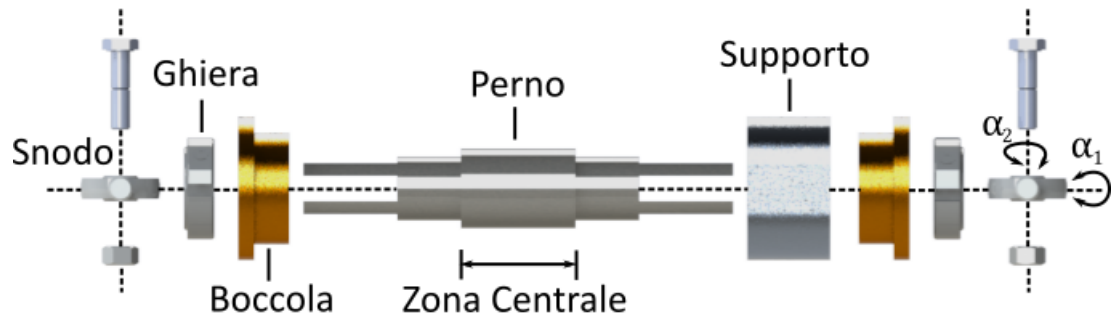


Figura 5.7: Esploso del vincolo universale sulla piattaforma

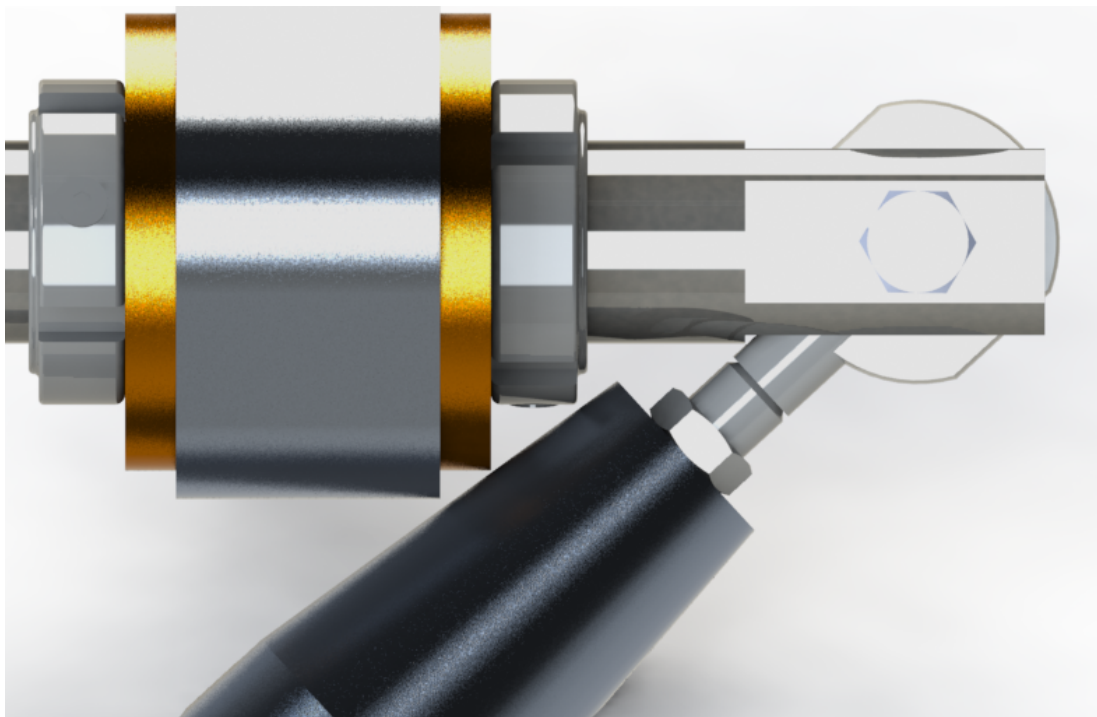


Figura 5.8: Limite di α_2

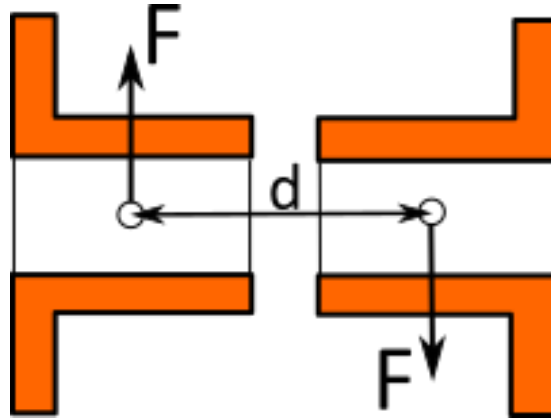


Figura 5.9: Forze esercitate dalle boccole

Le boccole possono esercitare globalmente una forza radiale rispetto al loro asse. Facendo riferimento alla figura 5.9 si vede come la scelta delle boccole dipende anche dalla scelta della distanza d tra i centri di applicazione di tali forze, distanza che è figlia delle dimensioni di supporto e boccole. Come centro di applicazione si prende la mezziera sulla lunghezza della singola boccola. La forza che deve esercitare la singola boccola vale:

$$F = \frac{C_{p,max}}{d} + F_{t,max} = 3048.7[N] \quad d = 20[mm] \quad (5.8)$$

Il valore di d finale deriva da una serie di prove sulle verifiche di carico dinamico e statico delle varie boccole inizialmente selezionate ed alcune esigenze costruttive. La verifica tecnica sulla singola boccola consiste nel verificare che il carico specifico p non superi il limite sul carico dinamico e la velocità di strisciamento non ecceda il valore $0.5[m/s]$.

$$p = \frac{F}{d_b \cdot b} = 7.62[MPa] \quad (5.9)$$

I termini d_b e b dell'equazione 5.9 sono rispettivamente il diametro interno della boccola e la sua lunghezza. La verifica sul carico dinamico è passata con successo. Per valutare la velocità di strisciamento tra perno e boccola viene usata la massima velocità angolare del perno durante le simulazioni dinamiche, $\omega_{p,max} = 104[deg/s]$, con cui si arriva a dimostrare che anche la verifica sulla velocità di strisciamento è rispettata.

$$v_{s,max} = \omega_{p,max} \cdot \frac{d_b}{2} = 0.023[m/s] \quad (5.10)$$

Il perno del vincolo è realizzato in acciaio. Unico componente tra quelli progettati non fatti in alluminio. Questo per via dell'accoppiamento con le boccole in bronzo che richiedono un albero la cui durezza superficiale sia tra i 165 e i 400 HB. Tali valori sono difficilmente raggiungibili con l'alluminio e l'uso di quest'ultimo comporterebbe una prematura usura del perno ed il rischio di bloccaggio del sistema. Il perno alle estremità ha due forcelle in grado di abbracciare gli snodi lasciando libera una rotazione. La zona centrale del perno ha un diametro più grande delle estremità in modo da creare una battuta per le ghiere che ne fisseranno la posizione.

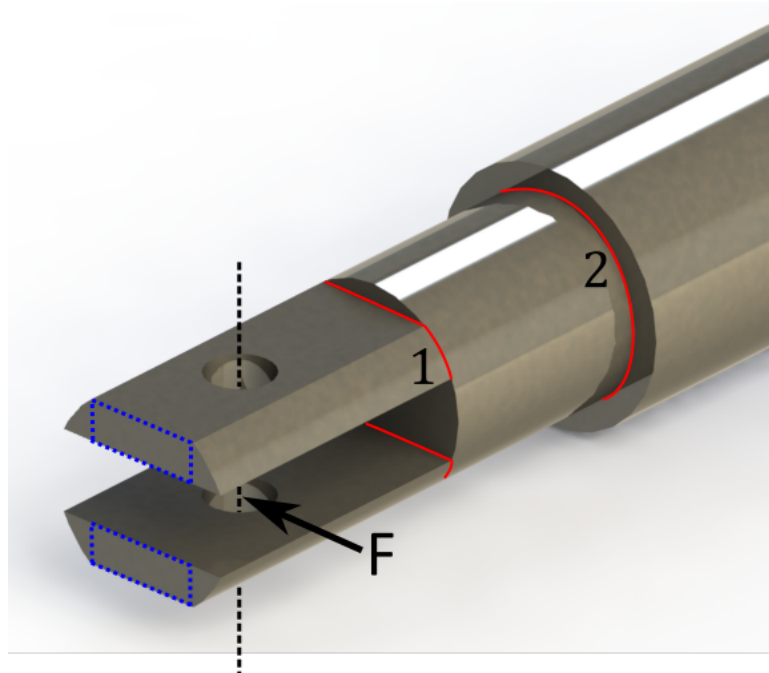


Figura 5.10: Sezioni critiche del perno

Tabella 5.4: Acciaio C40

$R_{p0,2}[MPa]$	$R[MPa]$	$E[GPa]$	HB
460	750	220	180

Anche per il perno si verifica che l'entità degli sforzi durante l'esercizio non sia elevata in modo da limitare le deformazioni. Considerando la forza massima agente sul link, $F_{x,max} = 526.3[N]$, forza di taglio sul pezzo, vengono effettuate delle verifiche in due sezioni ritenute critiche e sottolineate in figura 5.10. Nelle due sezioni si ottengono i momenti:

$$M_1 = 8947.1[Nmm] \qquad M_2 = 20788.9[Nmm] \qquad (5.11)$$

Per la sezione 1 si considera l'inerzia di due figure rettangolari, in blu in figura 5.10, comprese all'interno della sezione reale; questa scelta andando a diminuire il valore dell'inerzia va a favore di sicurezza. Per la seconda si usa l'inerzia di un tondo e si considera un coefficiente di intaglio $K_t = 2.5$. I valori di sforzo massimo ottenuti sono:

$$\sigma_{x1,max} = 46.6[MPa] \quad \sigma_{x2,max} = 33[MPa] \quad \epsilon_{x1,max} = \frac{\sigma_{x1,max}}{E} = 0.218 \cdot 10^{-3} \quad (5.12)$$

Per la tipologia di acciaio con cui fare il perno bisogna tener conto degli sforzi massimi, che sono comunque abbastanza bassi, e della durezza superficiale per un buon accoppiamento con le boccole. Si sceglie un acciaio C40 le cui caratteristiche sono mostrate in tabella 5.4.

Per quanto riguarda la realizzazione del vincolo universale si conclude dicendo che la scelta delle ghiere è dettata dal diametro del perno. Le ghiere oltre ad assicurare la

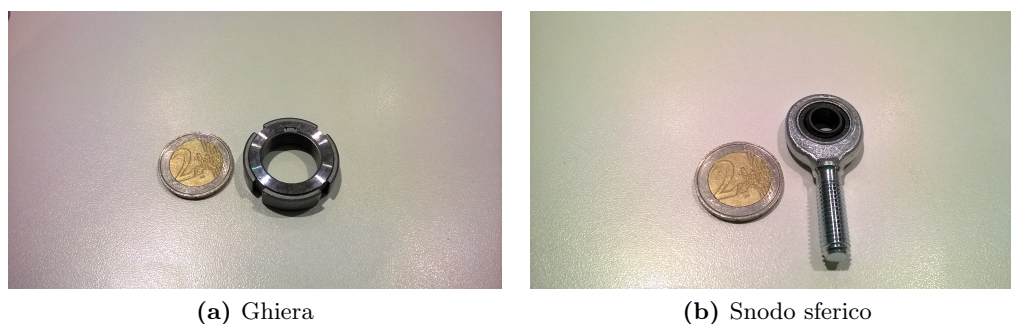


Figura 5.11: Ghiera e Snodo Sferico

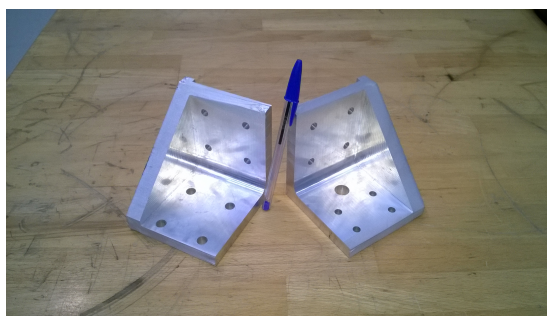


Figura 5.12: Angolari

posizione del perno devono sostenere i carichi assiali sul perno stesso; il valore massimo ricavato è di $68.7[N]$. È stata selezionata la ghiera di serraggio SKF KMK 4 in grado di portare fino a $24[KN]$.

5.3.4 Angolari

Le due piastre della struttura devono garantire il corretto posizionamento delle guide. Per collegare nella maniera più precisa possibile le guide alle piastre vengono disegnati degli appositi angolari, tre per la piastra superiore e tre per la piastra inferiore. Nella foto di figura 5.12 sono visibili due angolari mentre nell'esplosivo di figura 5.13 se ne comprende il collegamento con guida e piastra. La parte interna dell'angolare è scavata in maniera tale da ospitare la piastra; le facce interne dell'angolare fungono da battute per un corretto accoppiamento. Le facce esterne vanno ad interfacciarsi con la guida grazie alle scanalature laterali della guida stessa e con l'uso di appositi dadi a T. L'angolare di figura essendo riferito alla piastra inferiore ha il compito di ospitare anche uno dei piedi snodabili su cui si regge tutta la struttura. La realizzazione dei sei angolari è avvenuta per fresatura a partire da un blocco intero di alluminio.

Gli angolari oltre a garantire un corretto posizionamento tra piastre e guide hanno una funzione strutturale importante. Gli angolari superiori devono garantire il sostegno della piastra, dell'estrusore e dei carichi da questo derivante; il meccanismo di estrusione si basa su una vite senza fine e ed un pistone che estrude il materiale. Sugli angolari inferiori si scaricano tutte le forze del sistema, quelle dell'estrusore, quelle del *Linear Delta* oltre al peso proprio dei diversi componenti. In questo lavoro non viene calcolato direttamente il valore di questi carichi ma si tiene conto del fatto di doverli sostenere; considerando i bassi carichi rilevati sugli altri componenti non si è proceduto a calcolare

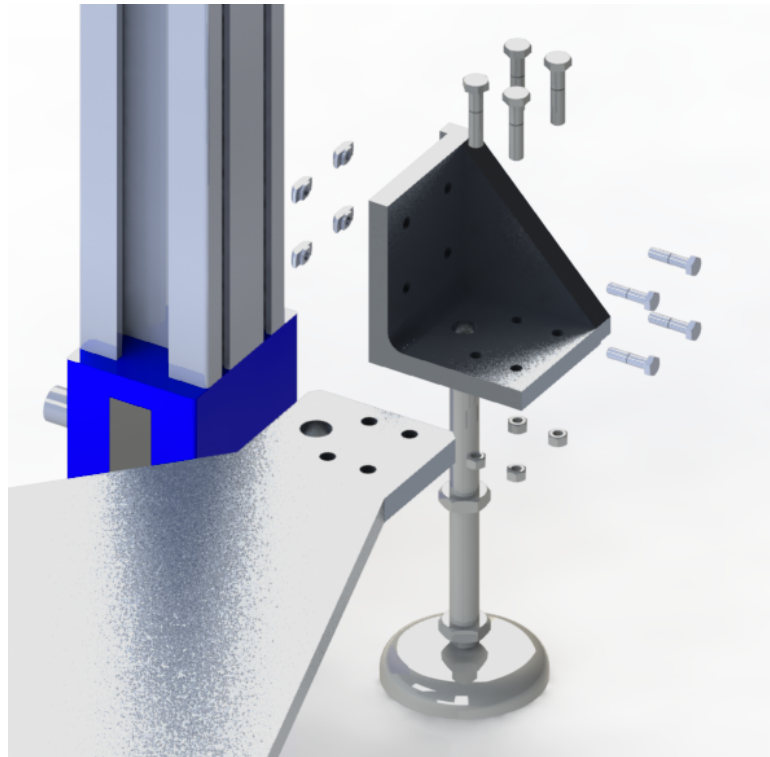


Figura 5.13: Esploso Angolare-Piastra-Guida Lineare

gli sforzi massimi sugli angolari che sono stati progettati con spessori adeguatamente elevati.

In figura 5.14 sono visibili la piastra superiore e la piattaforma, entrambe ricavate da una lastra di alluminio di 15[mm] di spessore attraverso taglio waterjet.

5.3.5 Sensore di posizione

Per misurare la posizione dello slider si ha la possibilità di usare un sensore ottico il cui funzionamento è basato su principi fotovoltaici. Questo sensore è in grado di leggere la posizione assoluta rispetto ad una apposita banda graduata. Il sensore è in grado di fornire un segnale digitale per il sistema a valle. In figura 5.15 si vede come il sensore, colorato in rosso, viene reso solidale allo slider. Al muoversi dello slider il



(a) Piastra Superiore

(b) Piattaforma

Figura 5.14: Piastra Superiore e Piattaforma

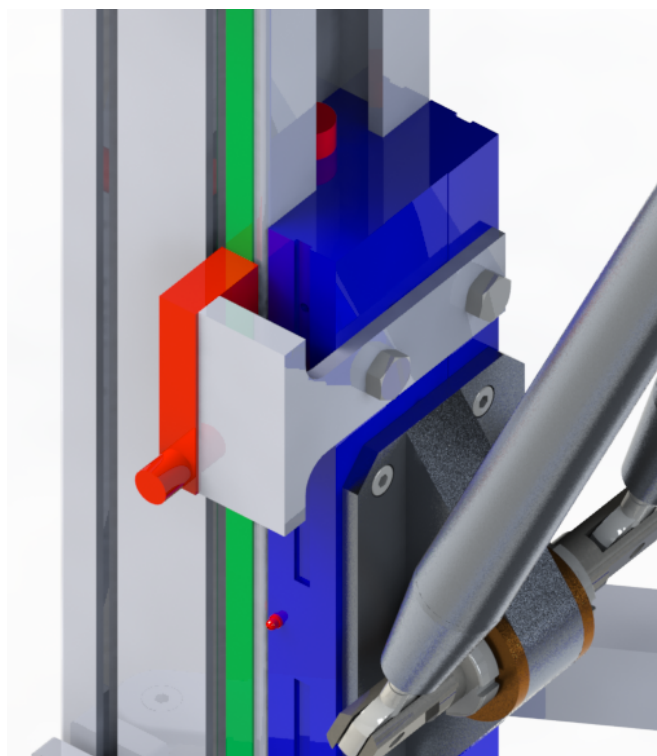


Figura 5.15: Sensore Ottico

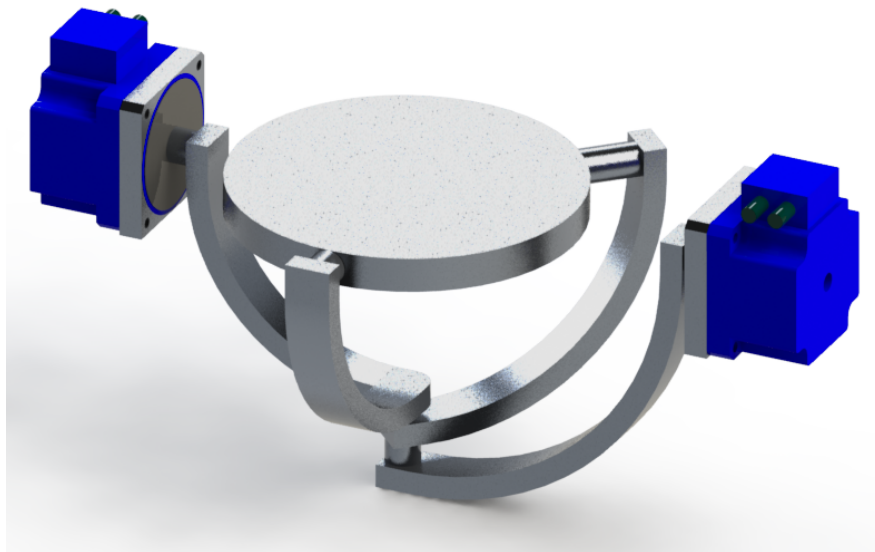
Tabella 5.5: Sensore ottico *Heidenhain LIC 4193M*

Risoluzione	Precisione Sistema	Velocità Traslazione
0.01[μm]	$\pm 3[\mu\text{m}]$	4[m/s]

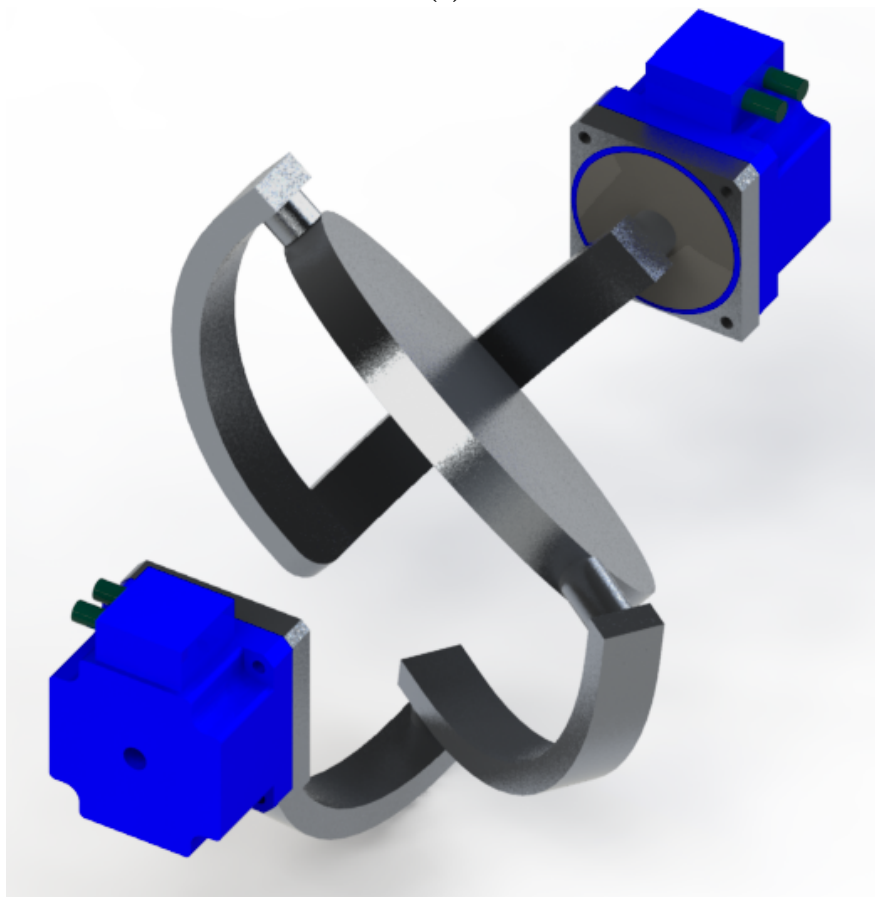
sensore leggera la propria posizione grazie all'interazione con la banda, in verde, che viene incollata sulla guida lineare. La lunghezza della banda è di 1000[mm] in accordo con la corsa resa disponibile dalla guida. In tabella 5.5 sono riportati i dati del sensore.

5.4 Agile Eye

In questo lavoro non viene affrontata la progettazione costruttiva di dettaglio dell'*Agile Eye*. Del robot a due gdl vengono definiti gli ingombri in modo da determinare la grandezza della piattaforma su cui deve poggiare. Tale dato è fondamentale per la progettazione e ottimizzazione del *Linear Delta*. Oltre a stabilire le dimensioni massime viene anche definita una soluzione costruttiva in grado di soddisfare le esigenze a cui deve andare incontro il robot, figura 5.16. In figura 5.16b si vede il robot in una configurazione ruotata. È importante che durante le rotazioni della piattaforma i link non vengano a trovarsi sopra di essa in modo da non fraporsi tra la piattaforma e l'estrusore impedendo la deposizione di materiale o ancor peggio andando a colpire il materiale già depositato. Bisogna inoltre assicurarsi che l'oggetto in costruzione sulla piattaforma non vada in contatto con le parti esterne della struttura, in primis i motori,



(a)



(b)

Figura 5.16: *Agile Eye*

durante la stampa del pezzo. Per la configurazione adottata si è verificato che questo non avvenisse per un cubo di lato 100[mm] entro rotazioni di $\pm 45^\circ$. In figura sono presentati dei motori Harmonic Drive in cui motore e riduttore risultano una soluzione unica. Questo permette di limitare masse ed ingombri dei gruppi motoriduttori; in fase di studio dinamico si è comunque tenuto conto di una massa motore-riduttore separati per affrontare la peggiore delle ipotesi.

5.5 Sistema di Controllo

La stampante 3D ha una struttura di controllo basata su un sistema acquistato insieme ai motori elettrici dalla casa Mitsubishi Electric. I componenti principali sono:

PLC Programmable Logic Controller, è una unità di controllo basata su un microprocessore solitamente usato per controllare lo svolgimento di attività da parte di macchinari e l'evolversi di processi. Consiste di una CPU con memoria ed una serie di interfacce I/O, input/output, con le quali è in grado di comunicare con le altre componenti del sistema. Un PLC ripercorre ricorsivamente delle righe di comando secondo una tempistica definita da un tempo ciclo, si parla di decine di millisecondi. Vengono registrate in entrata gli input, che sono condizioni di vero o falso, vengono svolti di conseguenza gli ordini richiesti e registrate le uscite. Esistono diversi linguaggi di programmazione dei PLC. Uno dei più usati e che fa da riferimento è il *Ladder diagram*, linguaggio grafico.

Motion Control Unit fino a 16 assi Si tratta di una unità di controllo modulante basata su una CPU ed una memoria. Viene eseguito un controllo in real time fornendo i riferimenti per le variabili di controllo.

Servo drive con controllo in anello chiuso integrato I servo drive sono in primis dei sistemi di alimentazione dei motori garantendo un'alimentazione trifase. Nei servo drive inoltre vengono chiusi i tre anelli di controllo dei motori, corrente, velocità e posizione.

La stampante 3D ha 5+3 assi da controllare. I primi cinque riferiti al robot che ha il compito di muovere la piattaforma e tre sull'estrusore per coordinare la deposizione di materiale. Il sistema prevede un controllo in anello chiuso; relativamente all'*Agile Eye* l'anello viene chiuso sugli encoder dei motori elettrici mentre per i tre motori del *Linear Delta* è prevista una doppia soluzione. La prima prevede un controllo in anello chiuso basato sugli encoder dei motori elettrici che però ha lo svantaggio di non tenere in conto i giochi tra motore e riduttore, riduttore e guida e la flessibilità della cinghia della guida. Questo comporta un errore di posizionamento del singolo slider che conseguentemente porta ad un cattivo posizionamento della piattaforma finale. Per aggirare questo problema è prevista la possibilità di chiudere l'anello di controllo direttamente sugli slider grazie a dei sensori ottici. La misurazione diretta dello slider permette di migliorare la precisione di posizionamento della macchina. In figura 5.17 è visibile lo schema di controllo. Si noti come i collegamenti dal PLC fino al motore sono tutti bidirezionali, lo scambio di informazioni da un sistema all'altro è reciproco. I motori forniscono ai servo drive la loro posizione per via degli encoder; grazie a questo collegamento è possibile controllare in posizione i motori.

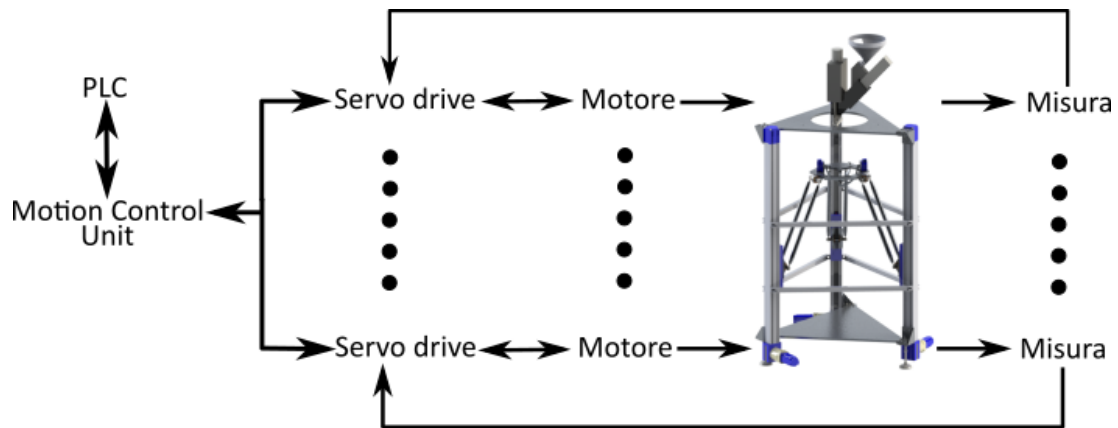


Figura 5.17: Schema del sistema di controllo

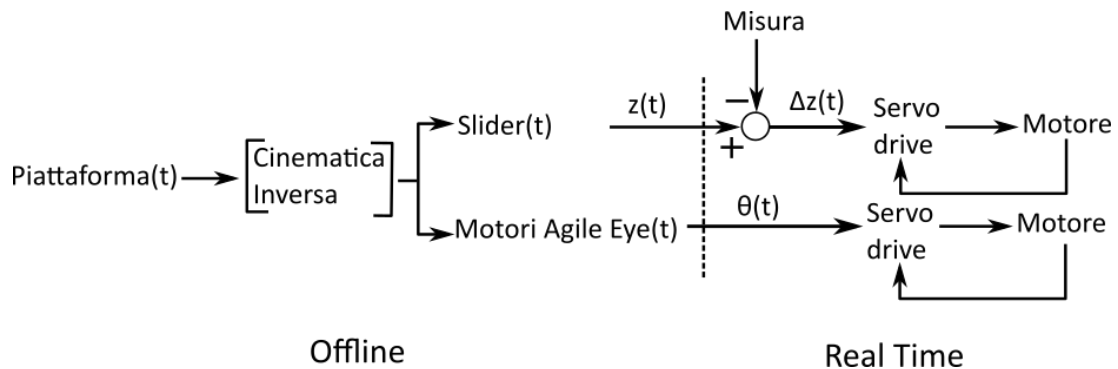


Figura 5.18: Controllo offline e real time

Il robot durante il suo lavoro deve eseguire traiettorie definite offline. La stampa di un oggetto 3D prevede la conoscenza a priori delle traiettorie che la piattaforma deve compiere in accordo con l'estrusione di materiale in modo che alla fine si ottenga l'oggetto desiderato. Con questa considerazione in mente si può meglio comprendere il secondo schema di controllo rappresentato in figura 5.18. Conoscendo a priori la traiettoria della piattaforma, attraverso l'utilizzo della cinematica inversa, si possono ottenere offline, cioè precedentemente alla fase di controllo in real time, gli andamenti nel tempo degli slider per il *Linear Delta* e dei motori per l'*Agile Eye*. Una volta partita la stampa dell'oggetto inizia il controllo in tempo reale; i dati precedentemente salvati nella scheda di memoria del motion control unit vengono usati per comandare il sistema. Ipotizzando un controllo basato sulla misura degli slider avviene che le misure degli slider stessi vengono confrontate con il riferimento desiderato, l'errore generato viene usato da un controllo PID, interno al servo drive, per il controllo in posizione. Il servo drive agisce sul motore ma il controllo in posizione viene fatto sullo slider. Nel caso il controllo avvenga sulla posizione del motore si può facilmente tradurre uno spostamento dello slider in una rotazione del motore conoscendo il rapporto di riduzione ed il diametro della puleggia della guida. Internamente il servo drive controlla gli anelli di velocità e corrente del motore in modo da annullare l'errore in posizione. Per l'*Agile Eye* dove il controllo è basato sugli encoder dei motori il servo drive provvede alla chiusura dei tre anelli di controllo.

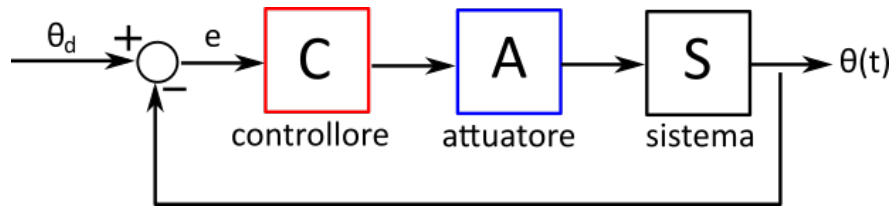


Figura 5.19: Controllo in anello chiuso

5.5.1 Anelli di controllo PID

Il sistema di controllo usato come precedentemente detto è di tipo PID, proporzionale-integrale-derivativo. Questo sistema di controllo in anello chiuso è uno dei più usati a livello industriale per la semplicità di utilizzo ed attuazione. Il concetto di anello chiuso si evince facilmente dalla figura 5.19; dato un variabile di controllo θ che si vuole abbia un certo andamento nel tempo, questa viene confrontata con una sua misura diretta od indiretta sul sistema S che si vuole controllare. La misura retroazionata chiude l'anello di controllo e dal confronto con il valore desiderato si ha un errore di misura e sul quale si può implementare una logica di controllo attraverso un controllore C ed azionare un sistema di attuazione, A , con il quale si può agire sul sistema stesso. Il controllo PID è rappresentato nel dominio del tempo dall'equazione:

$$u(t) = K_p[e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(\sigma) d\sigma + T_D \frac{de(t)}{dt}] \quad (5.13)$$

Dove K_p, T_I e T_D sono rispettivamente la costante di proporzionalità ed le costanti di tempo integrale e derivativa. Nel dominio di Laplace:

$$u(s) = K_p[1 + \frac{1}{sT_I} + sT_D]e(s) \quad (5.14)$$

Variando i tre parametri del controllo PID, che possono anche essere nulli, si variano le prestazioni del controllore e del sistema ad esso associato. Un motore elettrico presenta tre anelli di controllo uno interno all'altro. Questa logica prevede che un anello interno abbia una dinamica molto più veloce rispetto a quella della dell'anello immediatamente più esterno. La variabile di controllo dell'anello interno deve raggiungere il riferimento con una velocità tale che le sue variazioni possano essere considerate istantanee dall'anello esterno. Questo è importante in quanto la progettazione del controllore per ogni anello è separata dagli altri; il non verificarsi di quanto detto potrebbe compromettere la stabilità del sistema. I tre anelli del motore sono:

- corrente
- velocità
- posizione

L'anello della corrente serve a regolare la coppia fornita dal motore, inoltre è importante tenere sotto controllo questa variabile per evitare che assuma valori che possano danneggiare il motore stesso. L'anello di velocità e posizione servono a far sì che il sistema controllato dal motore segua le traiettorie desiderate. In figura 5.20 vi è una rappresentazione dei due anelli più esterni. L'anello elettrico, interno al sistema motore

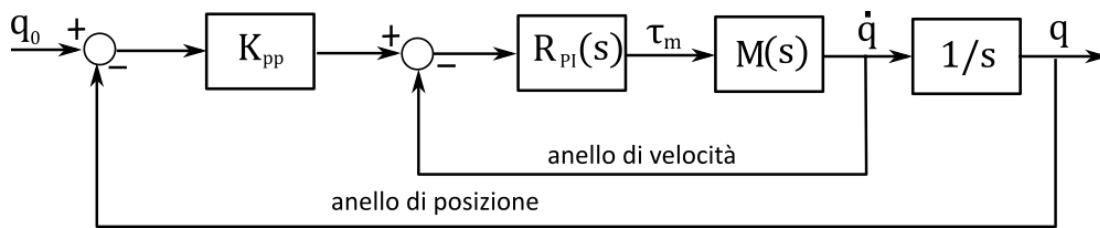


Figura 5.20: Anelli di controllo del motore elettrico

$M(s)$, viene ommesso per semplicità ed in quanto cambia a seconda del tipo di motore che si ha. In entrata al sistema motore si ha la coppia di riferimento τ_m . Si vede dal disegno come vengono retroazionate le due variabili q , posizione motore, e \dot{q} , velocità. Nella realtà pratica la velocità è di solito ottenuto per derivazione dalla posizione motore che viene misurata dall'encoder. Nello schema per i due anelli sono rappresentati due controllori separati, uno puramente proporzionale K_{pp} , e l'altro proporzionale derivativo, R_{PI} .

5.5.2 Schema Elettrico

In questo lavoro viene presentato lo schema elettrico relativo al sistema di controllo del *Linear Delta*. In questa sezione viene mostrato sia uno schema elettrico semplificato, da cui si prende spunto per spiegare il funzionamento dello stesso e delle parti che lo compongono, sia lo schema elettrico effettivo. In figura 5.21 viene rappresentato lo schema elettrico con un solo motore ed un solo servo drive. L'aggiunta degli altri due motori e servo drive non cambia la logica dello schema e avrebbe solamente complicato un disegno che risulta invece così di più facile comprensione. I componenti elettrici principali oltre quelli precedentemente menzionati sono:

Alimentatori Servono a garantire la corretta fornitura di energia elettrica in termini di tensione, V, convertendo la corrente alternata in continua e mantenendo il valore di tensione costante. Sono presenti tre alimentatori, uno per il PLC e Motion Control a 5V, e due da 24V per i circuiti di input-output del servo drive e per il freno elettromagnetico del motore.

Interruttore Magnetotermico Garantiscono il passaggio di corrente fino ad un certo limite in modo da proteggere i circuiti a valle; possono sopportare per brevi periodi correnti superiori a seconda della classe di appartenenza. In ingresso al sistema abbiamo un interruttore da 25A, mentre uno da 6A prima del servo drive.

Relè Sono interruttori in grado di aprire o chiudere uno o più circuiti in funzione di una mancata alimentazione o meno del relè stesso.

Contattore Funzionalità simile al relè; è di solito in grado di gestire potenze più grandi di quest'ultimo. Nello schema è presente un solo contattore in ingresso del servo drive.

Entrando a spiegare le funzionalità dei vari circuiti dello schema si tenga presente come gli elementi aventi identico nome, per esempio il *Contattore A*, non sono intesi come due elementi fisicamente separati e identici in tipologia; si tratta bensì dello stesso elemento fisico riproposto più volte perchè collegato a più circuiti.

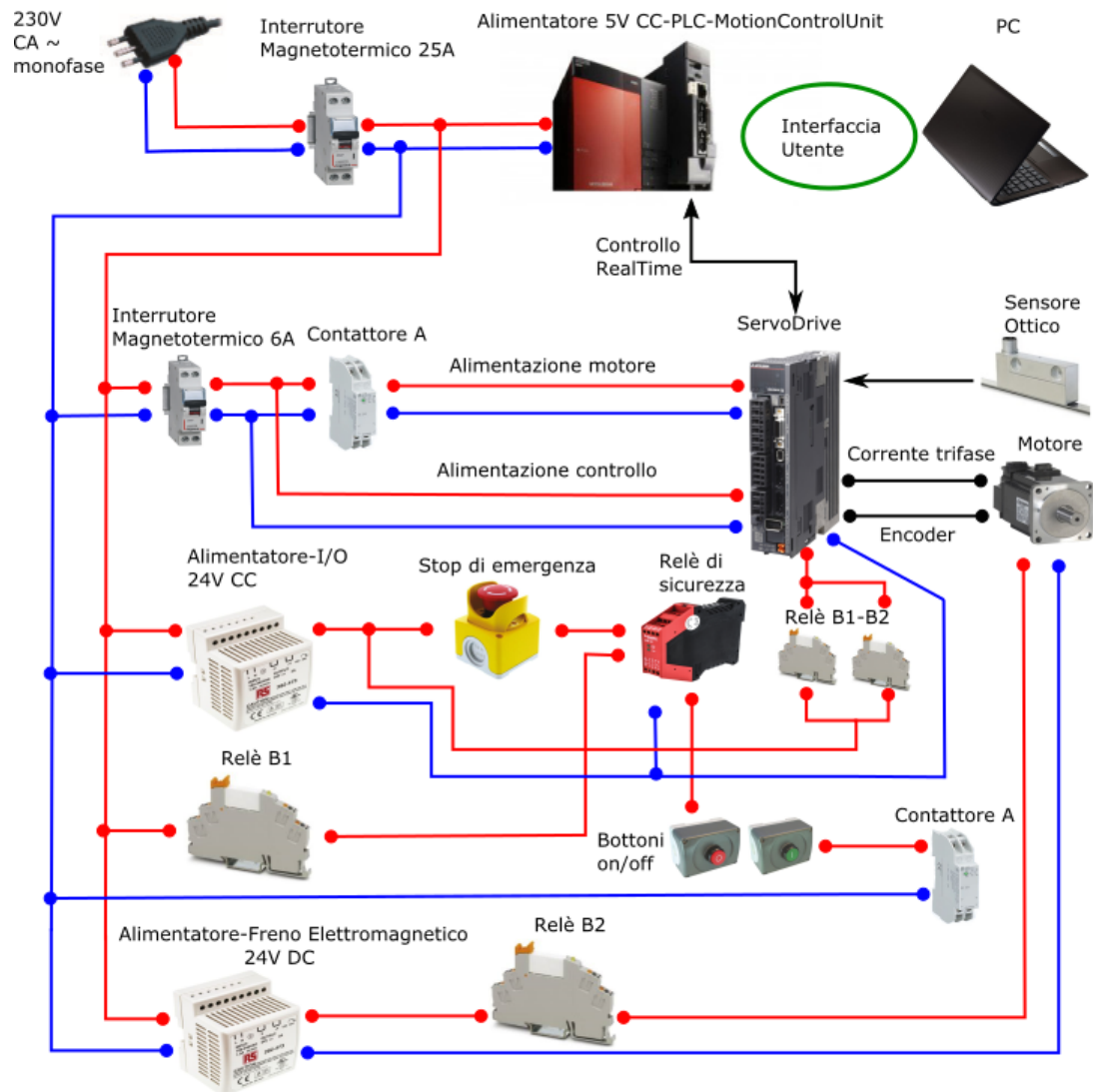


Figura 5.21: Esempificazione dello schema elettrico

Il collegamento alla rete esterna prevede il prelievo di corrente monofase a 230V; questa scelta è possibile in quanto i servo drive sono in grado internamente di convertire la corrente in trifase e con essa alimentare i motori elettrici. Il sistema alimentatore-PLC-Motion è un blocco unico, le tre componenti sono montate su un rack che garantisce la comunicabilità tra queste parti. L'alimentatore provvede a fornire energia a PLC e Motion. Il motion è collegato direttamente ad un servo drive per il controllo in real time. Un utente esterno può collegarsi direttamente al sistema collegandosi al PLC, al Motion od anche direttamente al servo drive. In questo modo oltre a programmare offline le componenti del sistema ne si può monitorare l'andamento durante le fasi operative. Il servo drive riceve corrente in alternata; è importante notare come la corrente in ingresso viene divisa su due rami. Uno serve all'alimentazione dell'elettronica di potenza e quindi ad alimentare i motori. Il secondo alimenta il sistema di controllo interno al servo drive. In questo modo è possibile togliere corrente ai motori senza spegnere il sistema di controllo. Il servo drive alimenta il motore in corrente trifase e riceve il segnale dell'encoder sulla posizione del motore; al servo drive è possibile collegare il sensore ottico per la chiusura dell'anello di posizione. Al servo drive sono collegati due relè, B1 e B2. Il relè B1 chiude il circuito legato al contattore A il quale garantisce l'alimentazione per il motore. Il relè B2 è invece legato al circuito del freno elettromagnetico del motore. Il servo drive può nel momento in cui rileva dei problemi staccare la corrente ai motori ed azionare i freni elettromagnetici. Nel momento in cui il servo drive fa mancare corrente al relè B1 questo apre il circuito togliendo corrente al contattore A e di conseguenza questo apre il circuito con cui forniva energia al servo drive. Stessa logica vale per il relè B2; nel momento in cui il freno elettromagnetico non è più alimentato questo entra in azione fermando completamente il motore. Si può in caso di emergenza togliere manualmente potenza ai motori attraverso il pulsante di stop. Questo toglie corrente al relè di sicurezza che apre il circuito a cui è legato il contattore A. I pulsanti on/off servono per la regolare accensione e spegnimento del sistema.

In figura 5.22 è presente lo schema elettrico completo del *Linear Delta*. In questo schema si possono notare dei particolari che per semplicità in figura 5.21 erano stati omissi. Il motion è collegato non solo all'alimentatore da 5V ma ha un collegamento con il circuito da 24V legato al relè di emergenza. Nel momento in cui si toglie corrente con il pulsante di emergenza viene a mancare corrente a questo circuito. Il motion in automatico riceve l'informazione che si vuole arrestare il sistema e provvede di conseguenza iniziando delle procedure di arresto per i motori. Questo evita che in caso si voglia interrompere con emergenza le operazioni e si vada a togliere corrente ai motori il sistema di controllo cerchi di continuare il lavoro in atto invece di arrestare tutto. Si noti anche come il motion non è direttamente collegato a tutti e tre i servo drive ma solo al primo; i servo drive sono collegati tra di loro in serie e questo permette il controllo di tutti gli assi. Il nome del collegamento tra motion e servo drive, SSCNETIII/H, indica il protocollo di comunicazione tra le due parti. Infine si veda come il pulsante on per la normale accensione preveda un sistema di ritenuta per tenere chiuso il circuito fino a che non viene spinto il pulsante di off.

Di tale circuito è verificato il corretto funzionamento. Per dimensionare il sistema si è tenuto conto di:

- 3 servo drive
- 2 alimentatori da 24[V] e uno da 5[V]

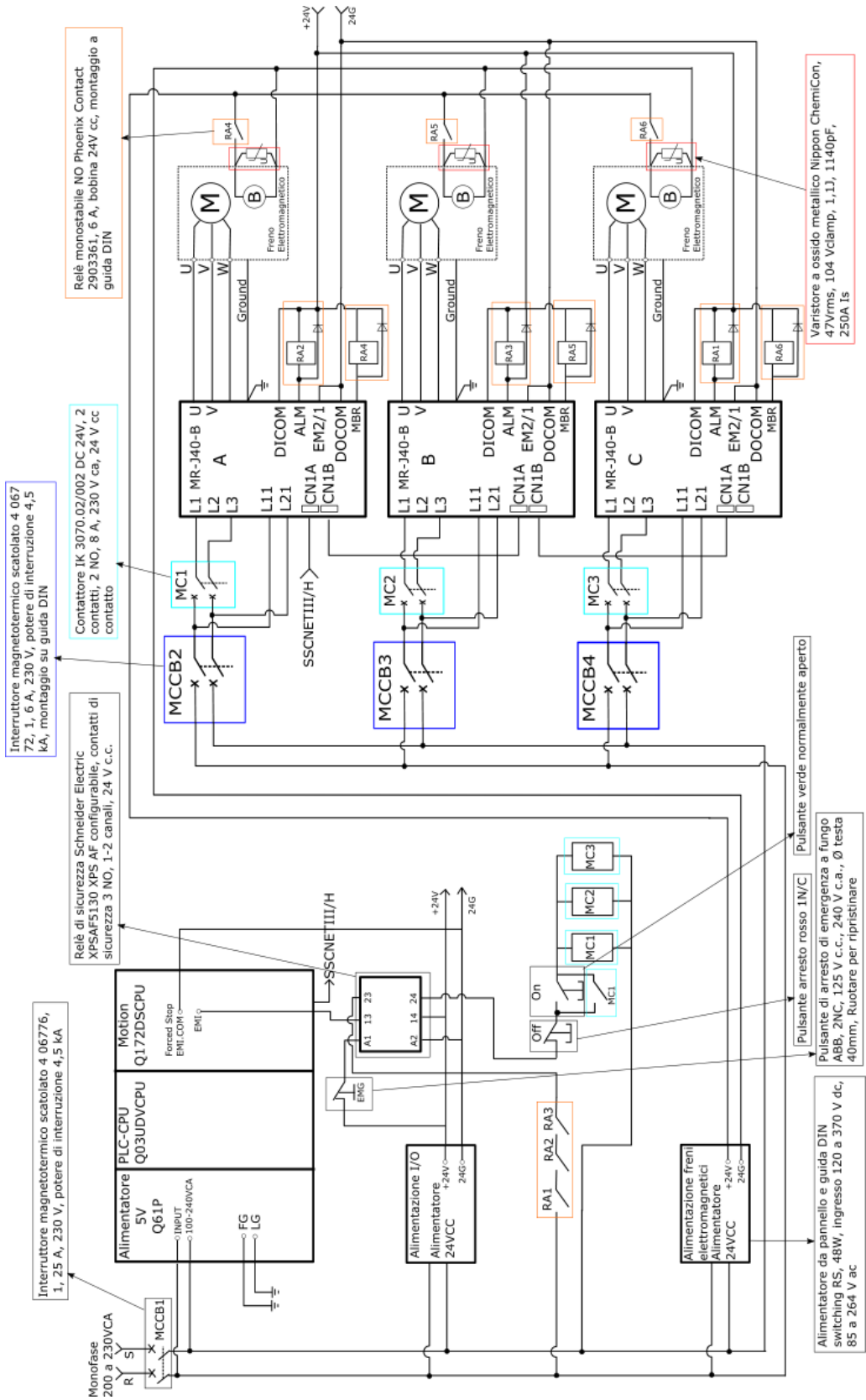


Figura 5.22: Schema elettrico del Linear Delta

Tabella 5.6: Tensione e corrente in ingresso ai componenti del circuito

Componente	Tensione[V]-AC	$I_{n,i}$ [A]
Servo drive	230	4.5
Alimentatore 5V	230	0.5
Alimentatore 24V	230	0.75

I motori sono alimentati dai servo drive che sono venduti in coppia ai motori stessi, per questo non vengono tenuti in considerazione. In tabella 5.6 sono forniti i dati in ingresso di tensione e corrente ai vari componenti in base ai quali è stato dimensionato il circuito. Dalla rete è prelevata corrente con tensione 230[V]-AC per un massimo di 16[A] in grado di soddisfare la richiesta di corrente massima, 15.5[A] e potenza di 3655[W]. Nel conto è stato considerato il consumo di potenza dei circuiti di controllo dei servo drive dichiarati a 30[W]. Gli alimentatori da 24[V] sono in grado di fornire in uscita una corrente nominale di 2[A]; i circuiti I/O di ogni singolo servo drive richiede una corrente massima di 200[mA]. Il singolo circuito per il freno magnetico richiede una corrente di 300[mA]. I due alimentatori sono quindi pienamente in grado di soddisfare le necessità del sistema. L'alimentatore da 5V è stato comprato insieme al PLC ed al motion; non si è avuta la necessità di verificare il soddisfacimento della richiesta di corrente a valle di tale alimentatore.

Tabella 5.7: Costi dei componenti acquistati

Componente	Costo[€]
Motore HG-KR 43B	495.68
MR-J4-40B-RJ	470.83
Q03UDVCPU	561.93
Q172DSCPU	1508.33
Guida Lineare ELM80	2163.23
Riduttore epicicloidale	331.26

5.6 Costi

In questa sezione si vogliono mostrare i costi affrontati nell'acquisto dei pezzi comprati esternamente al politecnico di Milano. In questo modo si vuole dare una idea di quanto possa costare una macchina di questo tipo considerando che quelli che vengono mostrati sono solamente i costi associati all'acquisto di alcuni parti; mancano i costi dei materiali e delle lavorazioni fatte internamente al dipartimento di meccanica, come non sono tenuti in conto i costi legati alle persone che hanno lavorato al progetto. In tabella 5.7 sono visibili i costi dei componenti fondamentali. I prezzi mostrati fanno riferimento al singolo componente e non al totale delle parti comprate. I componenti Q03UDVCPU e Q172DSCPU non sono altri che il PLC e la motion unit. Facendo riferimento ai preventivi di Mitsubishi Electri, Rollon e ai componenti elettrici acquistati si arriva ad una spesa totale di 14206.75 €. Sono considerati i prezzi esclusa l'iva e le spese di spedizione. I costi sostenuti sono sicuramente in linea con l'idea di costruire una

macchina per stampa di pezzi metallici 3D a basso costo relativamente alle odierne stampanti industriali.

Conclusioni

Questo lavoro di tesi ha conseguito il progetto per la costruzione di una piattaforma mobile per stampa 3D. Questa soluzione rappresenta un'innovativa tecnica di stampa basata su tecnologia MIM che si prospetta essere un'alternativa economica alla produzione di pezzi a base metallica attraverso tecnologie di Additive Manufacturing. La scelta dell'architettura cinematica basata su una soluzione ibrida è la conseguenza di uno studio sull'attuale stato dell'arte della stampa 3D e della necessità di soddisfare i bisogni tecnici di una nuova tecnologia produttiva. I 5 gdl dati dall'unione di *Linear Delta* ed *Agile Eye* permettono di affrontare problematiche legate ai costi e alla qualità del prodotto finale tipiche della stampa 3D dovute all'effetto staircase e all'utilizzo di materiale di supporto. Parte centrale del lavoro è stata l'ottimizzazione cinematica che ha permesso di raggiungere l'obiettivo di coprire lo spazio di lavoro desiderato rispettando allo stesso tempo dei vincoli di prestazione richiesti alla macchina. Lo sviluppo del modello dinamico ha permesso il corretto dimensionamento dei gruppi motoriduttori in funzione delle necessità della macchina ed ha fornito i dati di forze e coppie per il corretto dimensionamento dei componenti maggiormente sollecitati del *Linear Delta* in fase di progettazione costruttiva. Il sistema di controllo, acquistato da un'unica casa produttrice, è stato definito nelle sue diverse parti e ne è stato dato lo schema elettrico. Allo stato attuale la macchina è in fase di costruzione.

Possibili sviluppi futuri sono:

1. Progetto costruttivo di dettaglio dell'*Agile Eye* e sviluppo di un suo modello dinamico per il corretto dimensionamento dei suoi gruppi motoriduttori.
2. Definizione finale del sistema di controllo eventualmente basato sull'uso di sensori ottici per la misura degli slider o possibilità di un sistema che preveda la diretta misurazione della piattaforma del *Linear Delta*.
3. Studio dell'estrusore e delle forze da esso scaricate sul sistema. Integrazione dell'estrusore nel sistema di controllo.
4. Misurazione a posteriori della precisione di posizionamento della macchina e studio delle sue massime capacità dinamiche in funzione di utilizzo in altri campi al di fuori della stampa 3D.
5. Studio di calibrazione della macchina con conseguente analisi degli effetti degli errori costruttivi sulla precisione di posizionamento del sistema.
6. Studio complessivo degli sforzi interni alla struttura attraverso un modello agli elementi finiti e analisi delle frequenze proprie del sistema. Quindi possibilità di ottimizzare il progetto costruttivo della struttura.

APPENDICE A

Accenni di robotica

In questa appendice vengono date dei brevi accenni su concetti di cinematica e robotica in modo che possano essere meglio comprensibili le parti di studio ed ottimizzazione cinematica. Per approfondimenti si rimanda a testi specialistici quali *Robotica Industriale* di Giovanni Legnani.

A.1 Robot seriali e paralleli

Il termine *robot* ha un'origine non definita in maniera certa e il suo significato può essere inteso in maniere diverse. Limitatamente alle applicazioni industriali si intende un manipolatore multiscopo, a tre o più assi, programmabile e sottoposto a comandi automatici. Per assi si intendono i gradi di mobilità dei giunti del robot che possono essere di tipo rotativo o di traslazione. Le parti principali che lo compongono sono quindi:

- struttura meccanica(manipolatore)
- alimentazione di potenza
- sistema di comando

La possibilità di movimento di un robot vengono definite dall'insieme dei giunti passivi ed attivi della macchina. I giunti attivi sono quelli il cui movimento è controllato attraverso appositi attuatori, per esempio motori elettrici, tutti gli altri sono passivi. Il numero di giunti attuati definisce i gradi di libertà del robot. Se questi sono più di 6 è evidente che il robot presenta delle ridondanze.

La posizione e l'orientamento di una parte del robot viene definita posa. L'interesse principale si ha nella posa dell'ultimo elemento del robot o comunque di una sua parte specifica che il compito di effettuare un lavoro specifico. Questa parte, chiamata *end effector*, ha una posizione ed una orientazione definita rispetto ad un punto specifico detto TCP, *Tool Centre Point*. Le pose che può assumere l'*end effector* sono legate alla posizione dei giunti attuati. Si definiscono allora due spazi:

Spazio dei giunti L'insieme dei valori che possono assumere i giunti attuati.

Spazio di lavoro L'insieme delle pose che può assumere l'*end effector*.

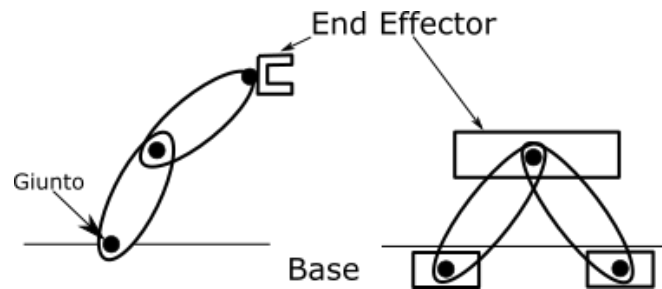


Figura A.1: Catena cinematica aperta e chiusa

Lo spazio di lavoro mi indica quali posizioni nello spazio posso raggiungere con il mio robot e con quale orientazione.

I robot possono in base alla loro struttura meccanica possono essere divisi in due grandi gruppi:

- Robot seriali

- Robot paralleli

I robot seriali sono costituiti da membri, singole parti del robot, collegate tra di loro da giunti in modo da formare una catena cinematica aperta. I robot paralleli sono invece costituite da catene cinematiche chiuse. Conseguenza di questa sostanziale differenza è il fatto che per i robot seriali i giunti possono essere attuati separatamente, un valore qualsiasi di posizione di ogni singolo giunto porta comunque ad una posa dell'*end effector*. Nei robot paralleli questo non è garantito. Determinate combinazioni di posizione dei diversi giunti potrebbero essere incompatibili e quindi impraticabili. Oltre ai due macrogruppi menzionati esistono robot ibridi dall'unione di robot seriali e paralleli. In figura A.1 vi è un esempio schematico di cosa sia una catena cinematica aperta, sinistra, e chiusa, destra. Partendo da un elemento fisso solidamente definito base per un robot a cinematica chiusa, parallelo, è possibile arrivare all'*end effector* e tornare alla base senza passare due volte per lo stesso membro. Questo è evidentemente impossibile per un robot con catena cinematica aperta, seriale. Nel caso di robot a cinematica parallela vengono denominati *full parallel robot* nel momento in cui il numero di catene cinematiche chiuse corrisponde al numero di gdl del sistema. Questa è una delle soluzioni più adottate che fa corrispondere ad ogni catena un attuatore in grado di azionarla.

A.2 Cinematica diretta ed inversa

Lo studio di un robot parte preliminarmente da un suo studio cinematico. Quello che si vuole è conoscere le relazioni che legano i giunti attuati, q_i , con le coordinate dell'*end effector*, x_i .

$$\begin{cases} x_1 = f_1(Q) \\ x_2 = f_2(Q) \\ \dots \\ x_i = f_i(Q) \\ \dots \\ x_n = f_n(Q) \end{cases} \quad \begin{matrix} X = F(Q) \\ Q = [q_1, q_2, \dots, q_j, \dots, q_m]^T \\ X = [x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n]^T \end{matrix} \quad (\text{A.1})$$

La conoscenza delle funzioni f_i permette di passare da Q ad X o viceversa. Nel primo caso si parla di cinematica diretta, nel secondo caso di cinematica inversa. Da un punto di vista formale le due cose sono pressochè equivalenti da un punto di vista pratico no. Nello studio di robot seriali si usa la cinematica diretta; è facile per questi robot assegnare dal primo giunto in avanti dei valori di posizione e andare a vedere in che posizione è finito l'organo finale. Al contrario molto più complicato sarebbe questo tipo di studio per robot a cinematica parallela dove è più facile operare in modo contrario, assegnare una posizione all'organo finale e vedere se questa è compatibile con una combinazione possibile delle Q . Si tenga conto che le relazioni f_i non sono necessariamente biunivoche, classico è il caso di robot seriali che possono raggiungere la stessa posizione finale con diversi valori dei giunti attuati. Dalla derivazione nel tempo delle relazioni A.1 è possibile ottenere il legame tra le velocità:

$$\dot{X} = [J(Q)]\dot{Q} \quad J(Q) = \frac{dX}{dQ} \quad (\text{A.2})$$

La matrice $[J(Q)]$ viene denominata matrice Jacobiana del sistema. Non è altro che l'insieme delle derivate delle relazioni f rispetto alle variabili q . Oltre a stabilire il legame tra le velocità la matrice Jacobiana esprime il legame tra le forze (o coppie) applicate all'*end effector* e quelle applicate ai giunti attuati. Differenziando la relazione A.1 otteniamo:

$$\delta X = [J]\delta Q \quad (\text{A.3})$$

Considerando il lavoro virtuale del sistema, δL , questo deve essere nullo per ogni spostamento possibile:

$$\delta L = \delta X^T f_e + \delta Q^T f_g \quad (\text{A.4})$$

Dove f_e sono le forze applicate all'*end effector* e f_g quelle degli attuatori sui giunti. Sostituendo a δX la sua espressione in A.3:

$$\delta L = \delta Q^T ([J]^T f_e + f_g) = 0 \quad (\text{A.5})$$

Siccome la relazione deve valere per ogni spostamento infinitesimo δQ deve valere:

$$[J]^T f_e + f_g = 0 \quad (\text{A.6})$$

E quindi:

$$f_g = -[J]^T f_e \quad (\text{A.7})$$

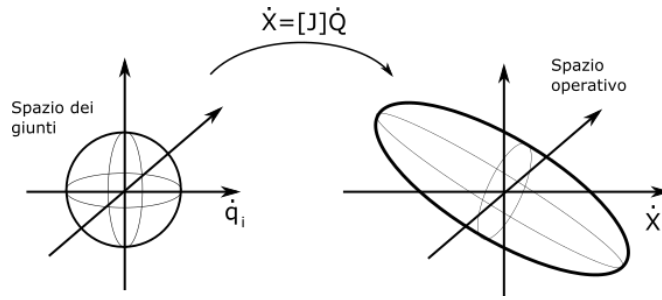


Figura A.2: Ellissoide di manipolabilità in velocità

Da considerare come questa analisi vale in una situazione statica del robot. Non si tiene conto di forze dinamiche o del peso proprio della struttura. Si parla di analisi cinetostatica.

A.3 Moltiplica delle forze e delle velocità

Dalle equazioni A.2 e A.7 è possibile valutare velocità e forze richieste agli attuatori a seconda di velocità e forze dell'*end effector* in ogni singola posa del robot. Si possono costruire quelli che vengono definiti ellipsoidi di manipolabilità. Assumendo che le velocità dei giunti siano limitate si può imporre che la norma del vettore Q sia minore di 1:

$$\|\dot{Q}\|_2 = \dot{Q}^T \dot{Q} < 1 \quad (\text{A.8})$$

La scelta che sia minore di 1 è arbitraria ma risiede nel fatto che non interessa un valore assoluto ma un riferimento. Potrebbe essere 1[m/s] come 1[mm/s]. La scelta di usare la norma euclidea è anch'essa arbitraria e conduce alla formazione di una ipersfera di raggio unitario. Considerando la relazione A.2 perchè valga l'equazione A.8 deve valere:

$$\dot{X}^T ([J]^{-1})^T [J]^{-1} \dot{X} < 1 \quad (\text{A.9})$$

Quest'ultima espressione è l'ellissoide di manipolabilità in velocità, figura A.2. Stesse identiche considerazioni possono essere fatte a partire dall'equazione A.7 ottenendo un ellissoide di manipolabilità in forza.

Partendo da queste considerazioni è spesso utile ragionare in senso inverso; considerare uno spazio operativo di \dot{X} e f_e uniforme attraverso un'opportuna norma e vedere attraverso l'uso di $[J]^{-1}$ e $[J]^T$ come questi si trasformino nello spazio dei giunti. Si noti come nel caso della relazione sulle forze vi è un segno meno nell'equazione A.7 davanti lo Jacobiano. Si può cambiare segno considerando le forze applicate dai giunti sull'*end effector* invece che le forze esterne, $f_C = -f_e$.

$$\tau_v = \|\dot{Q}\|_\infty = \|[J]^{-1} \dot{X}\|_\infty \leq \|[J]^{-1}\|_\infty \|\dot{X}\|_\infty \quad (\text{A.10})$$

$$\tau_f = \|f_g\|_\infty = \|[J]^T f_C\|_\infty \leq \|[J]^T\|_\infty \|f_C\|_\infty \quad (\text{A.11})$$

Le disuglianze scritte valgono per norme di matrici indotte, cioè derivanti da norme di vettori, e sono valide quindi anche per altre norme oltre quella infinito arbitrariamente scelta. La norma infinito di un vettore coincide con il suo elemento più grande in valore

assoluto mentre la norma infinito di una matrice coincide con il massimo tra le somme dei valori assoluti di ogni singola riga.

$$\|X\|_\infty = \max_{1 \leq i \leq n} |x_i| \qquad \|J\|_\infty = \max_{1 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n |a_{ij}| \qquad (\text{A.12})$$

In questo modo è stato possibile definire le moltipliche di velocità e forza, τ_v e τ_f . Imponendo che la norma dei vettori \dot{X} e f_C sia unitaria, questo nel caso della norma infinito vuol dire che la velocità e forza più grande applicata all'*end effector* non è più grande di uno, i valori di moltiplica sono unitamente legati allo Jacobiano del sistema. Avere dei bassi valori di moltiplica in una specifica posa del robot sta ad indicare che per velocità e forze unitarie sull'organo finale le velocità e forze sui giunti attuati rimangono contenute secondo un valore di proporzionalità espresso da τ_v e τ_f .

$$\dot{Q}_{i,max} = \tau_v \qquad f_{g,max} = \tau_f \qquad (\text{A.13})$$

A.4 Configurazioni Singolari

Le configurazioni singolari di un robot sono quelle per cui il determinante dello Jacobiano o del suo inverso si annullano:

$$\det([J]) = 0 \qquad \Leftrightarrow \qquad \det([J]^{-1}) = \infty \qquad (\text{A.14})$$

$$\det([J]^{-1}) = 0 \qquad \Leftrightarrow \qquad \det([J]) = \infty \qquad (\text{A.15})$$

Questo fatto corrisponde ad avere degli ellissoidi di manipolabilità in velocità o in forza degeneri, per cui uno o più assi dell'ellisse diventano infiniti. Da un punto di vista fisico questo sta ad indicare che in quella particolare posa può portare forze e velocità infinite sull'*end effector* lungo determinate direzioni. Questo non è un bene e lo si evince dai tre tipici casi di singolarità mostrati in figura A.3. Nel momento in cui si va ad annullare il determinante dello Jacobiano si vede come posso portare forze infinite lungo una direzione in quanto i carichi vanno a scaricarsi direttamente sui vincoli a terra. Questo comporta allo stesso tempo una perdita di mobilità lungo la medesima direzione. L'annullarsi del determinante dello Jacobiano inverso provoca il fatto di poter avere velocità infinite lungo una direzione ma allo stesso tempo di non poter portare nessun carico lungo la stessa. Si nota una dualità tra le posizioni in cui si possono portare carichi elevati e posizioni in cui si possono trasmettere elevate velocità; questa caratteristica è denominata dualità cinetostatica. Possono esserci configurazioni in cui vengono ad annullarsi tutte e due i determinanti. Durante lo studio cinematico di un robot si vuole che all'interno dello spazio di lavoro dell'*end effector* non ci si venga mai a trovare in una di queste configurazioni, non solo bisogna tenerne a debita distanza. Per fare questo di solito si fa riferimento agli ellissoidi di manipolabilità di cui si è visto assumono forme degeneri in posizioni singolari. La lunghezza dei semiassi degli ellissoidi è legata al reciproco dei valori singolari, σ_j dello Jacobiano:

$$\frac{1}{\sigma_j(J^{-1})} = \frac{1}{\sqrt{\lambda_j((JJ^T)^{-1})}} \qquad (\text{A.16})$$

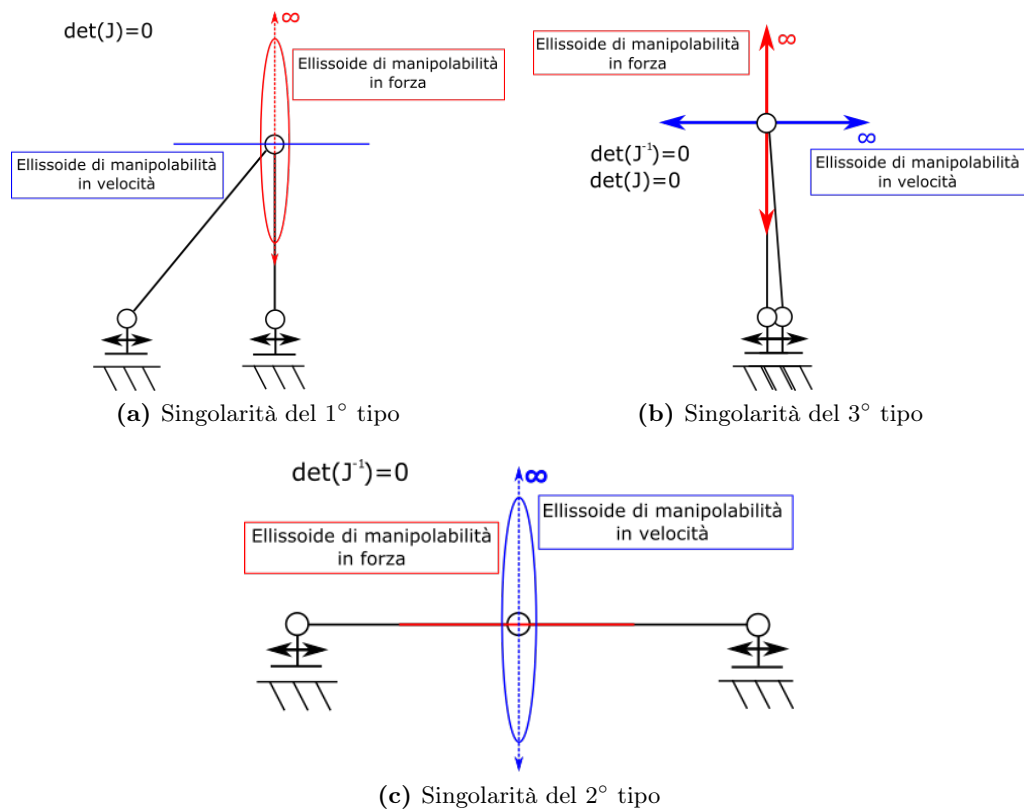


Figura A.3: Configurazioni Singolari

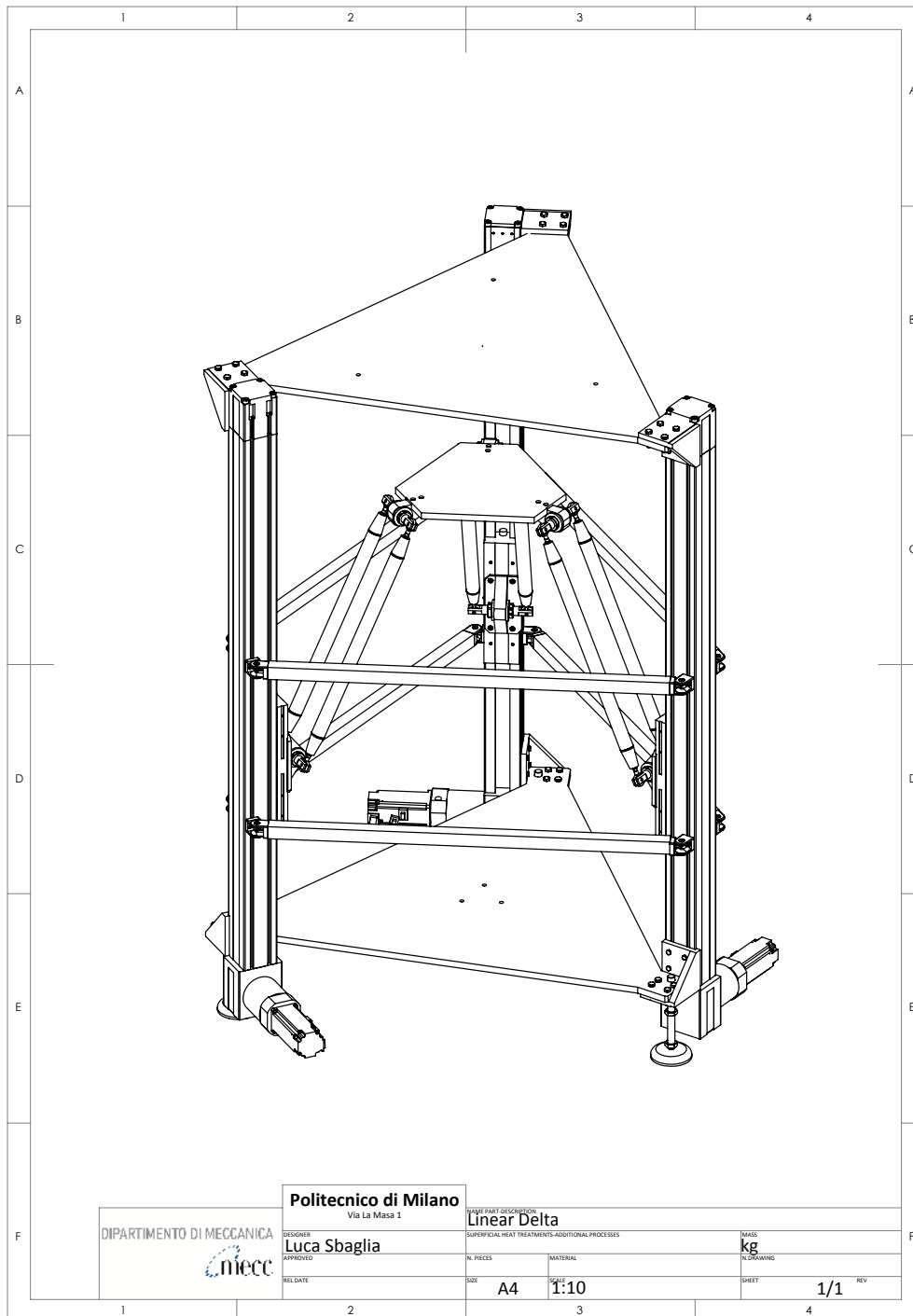
I valori singolari sono legati agli autovalori della matrice secondo la relazione descritta dall'equazione A.16. Pare evidente che per evitare posizioni singolari bisogna avere valori singolari che non tendano a zero. L'equazione A.16 fa riferimento ai valori singolari dello Jacobiano inverso e quindi alle relazioni sulle velocità tra giunti attuati e spazio operativo. Identiche considerazioni possono essere fatte sullo Jacobiano trasposto e quindi sull'ellissoide di manipolabilità in forza. Essendo la vicinanza di un robot alle proprie configurazioni singolari descrivibile tramite gli ellissoidi di manipolabilità si vede come queste sono anche legate alle moltipliche di velocità e forza. In configurazioni singolari queste tendono ad assumere vicendevolmente valori infiniti; lungo le direzioni in cui è possibile carichi infinite si avranno elevate moltipliche di velocità, viceversa lungo direzioni a velocità infinita si avranno elevate moltipliche di forza.

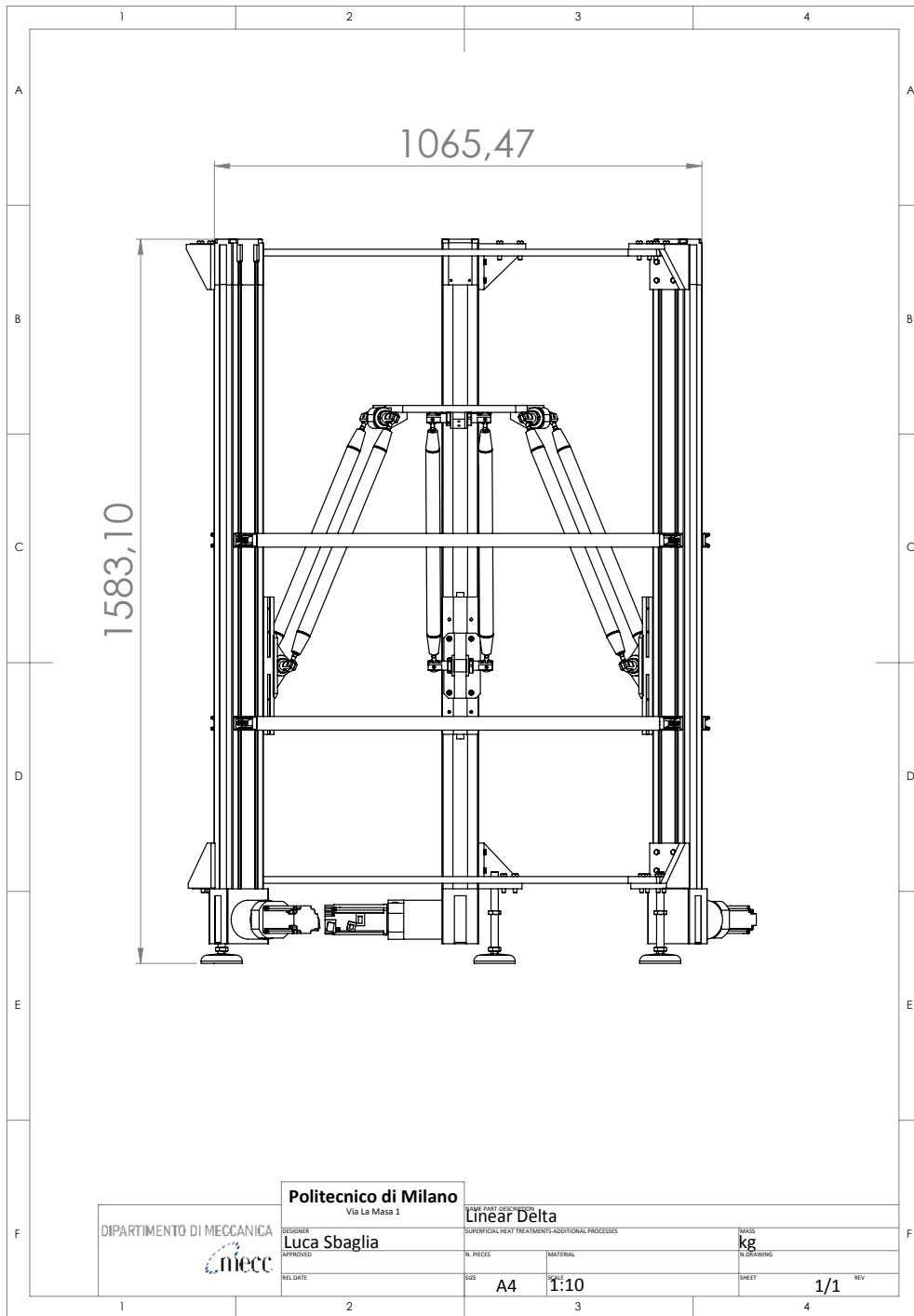
APPENDICE B

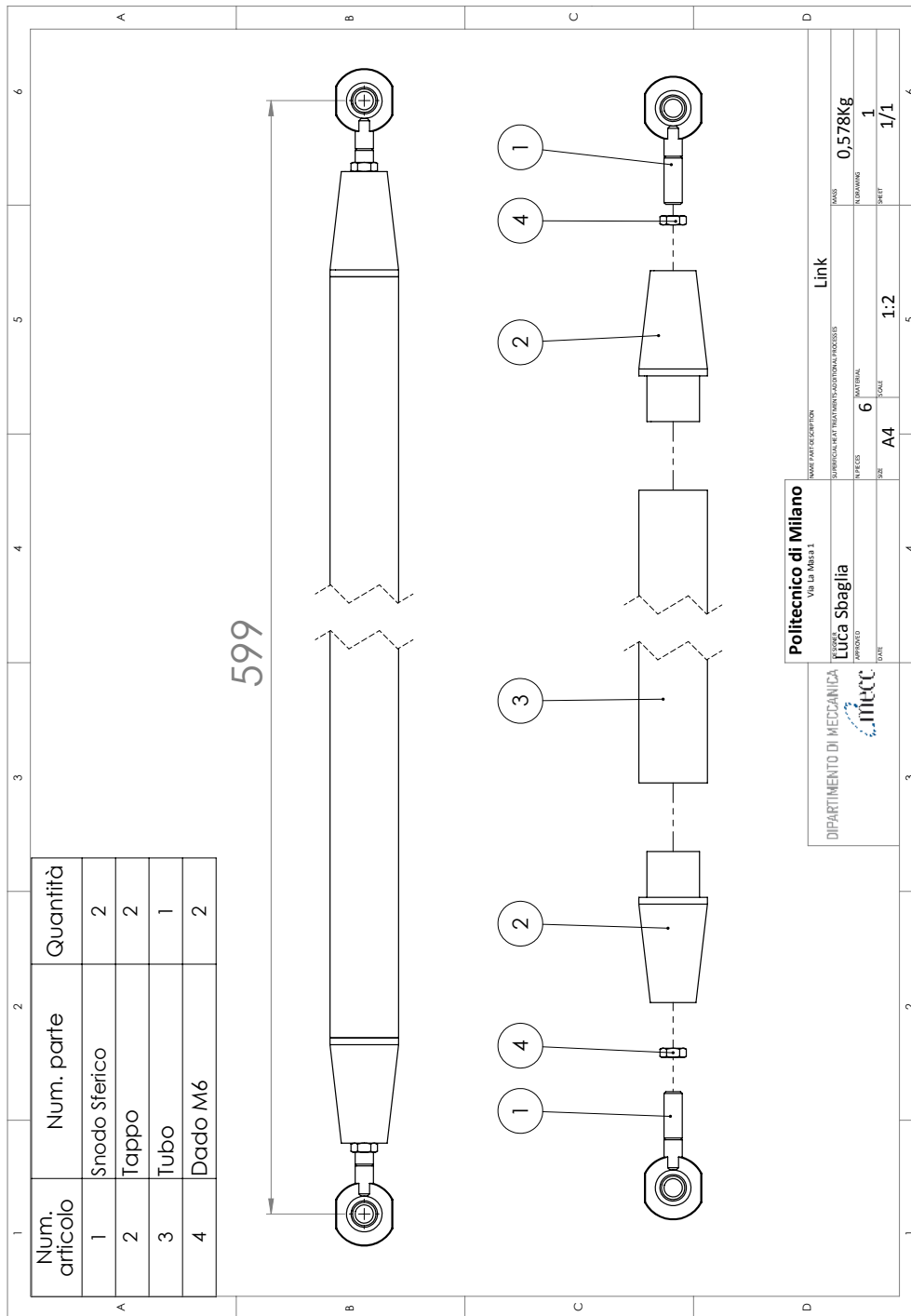
Disegni e schede tecniche

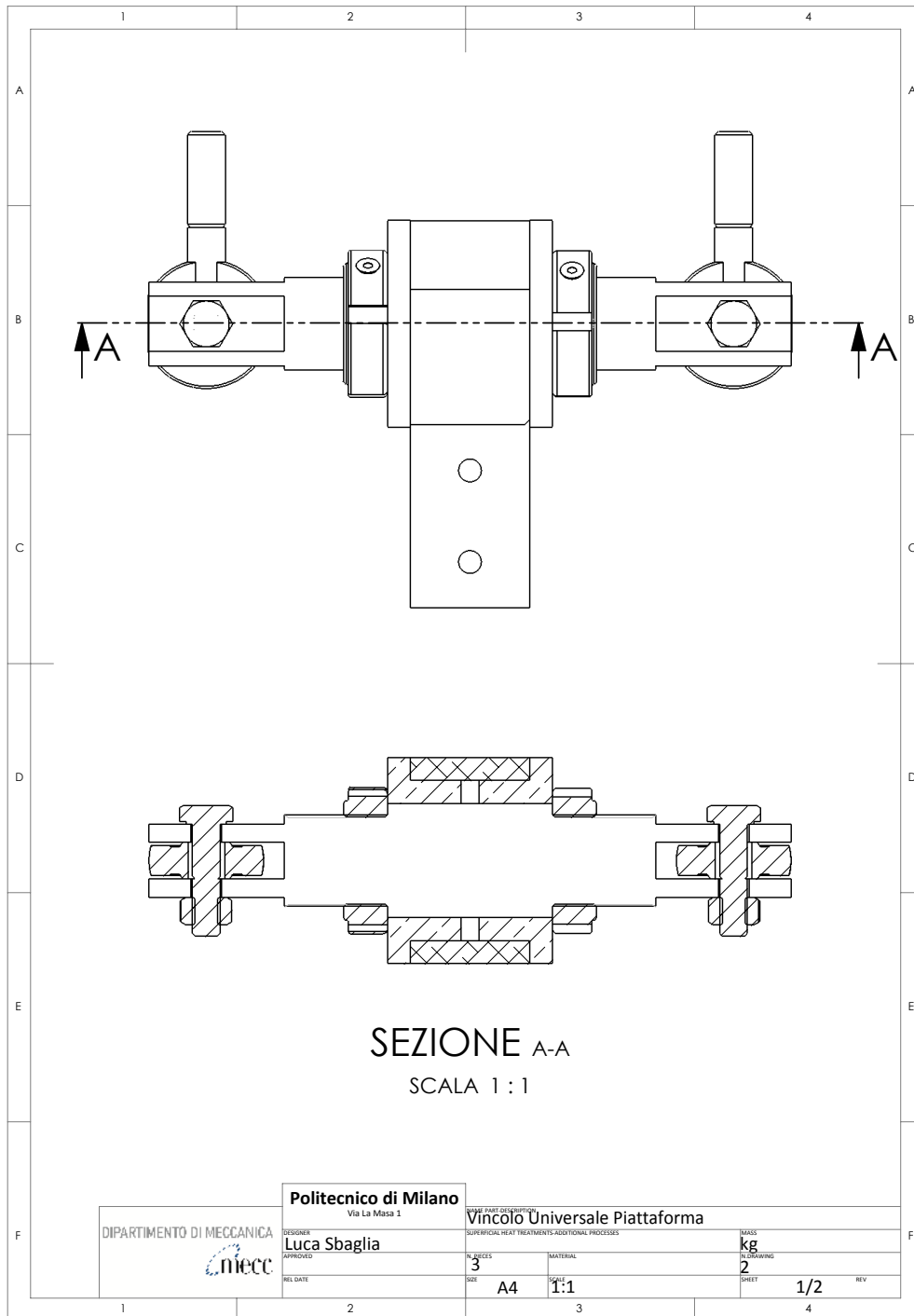
In questa appendice vengono illustrati i disegni tecnici relativi alla progettazione del *Linear Delta* e le schede tecniche dei componenti acquistati motore, riduttore e guida lineare. Per necessità di stampa i disegni tecnici risultano di dimensioni ridotte rispetto alla scala indicata sui fogli tecnici di base A4; le quotature sono in mm.

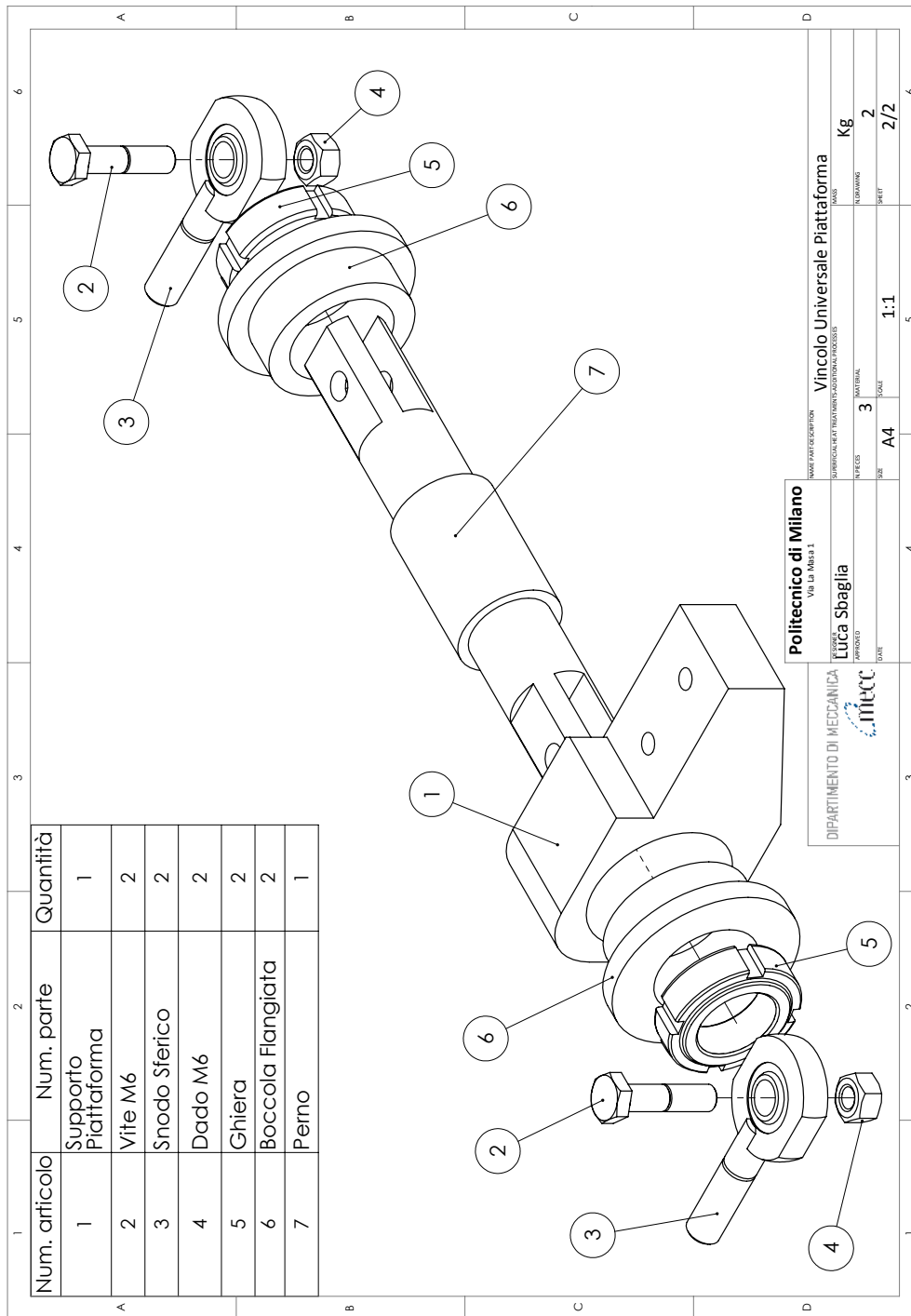
B.1 Disegni Tecnici

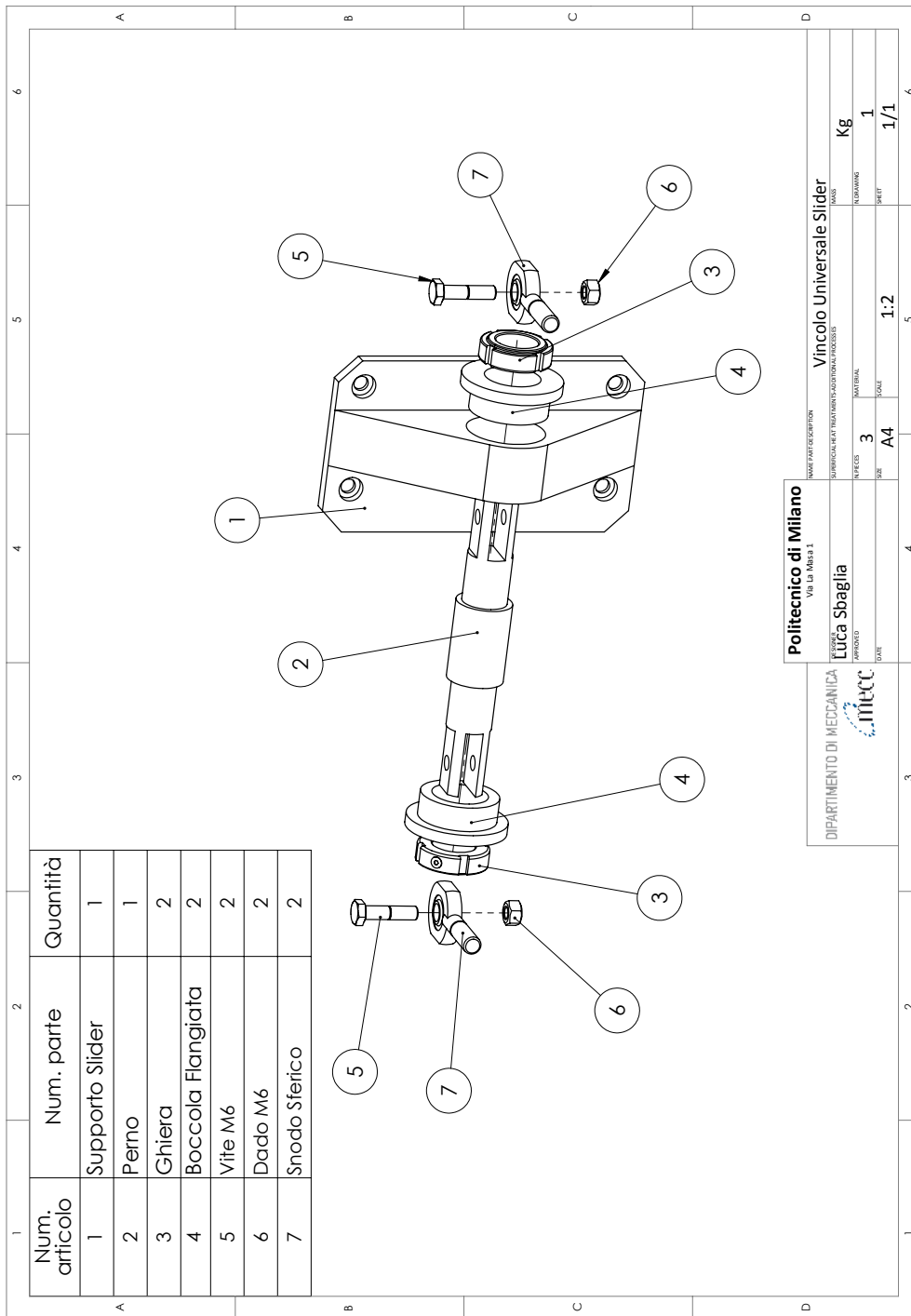


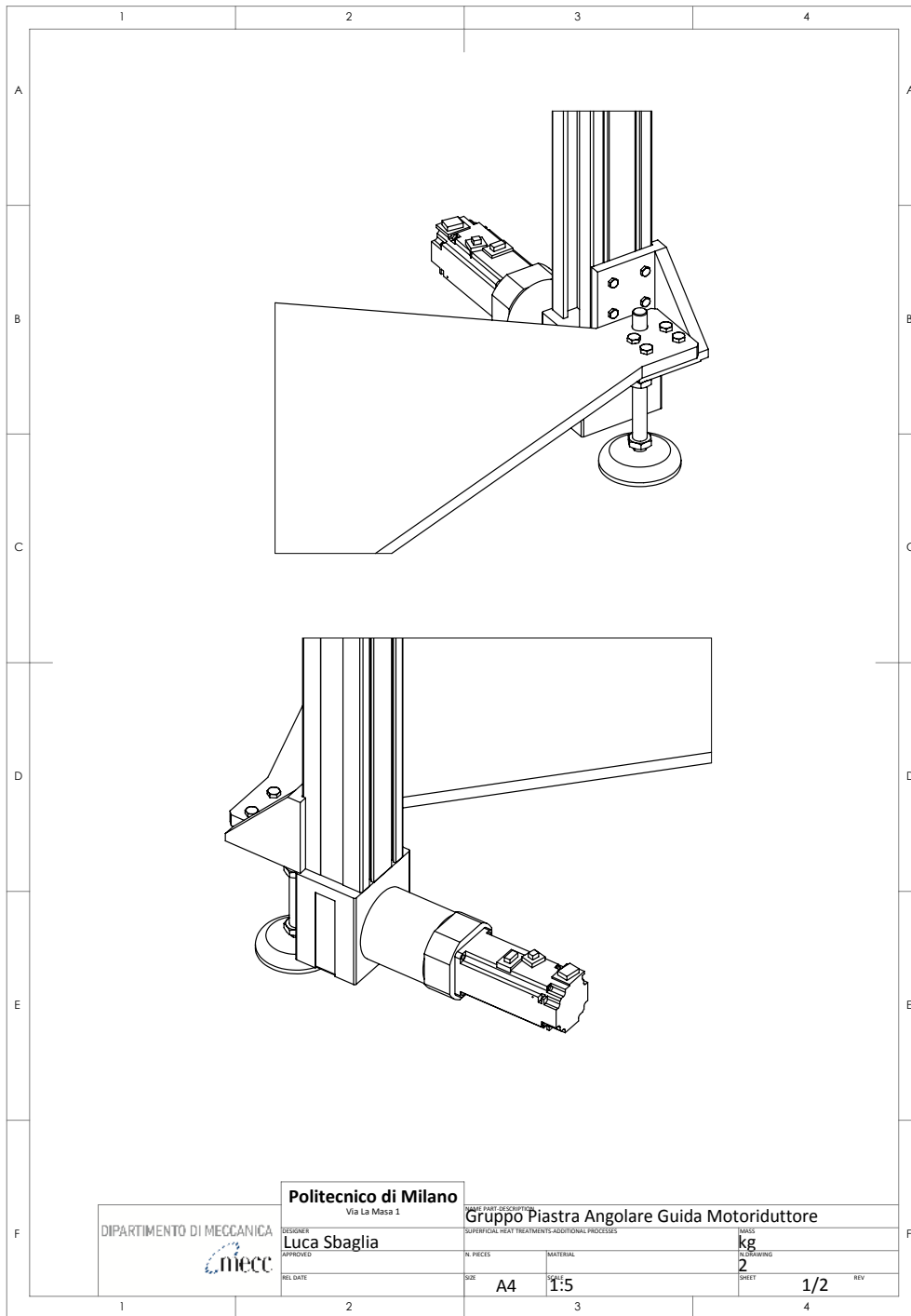


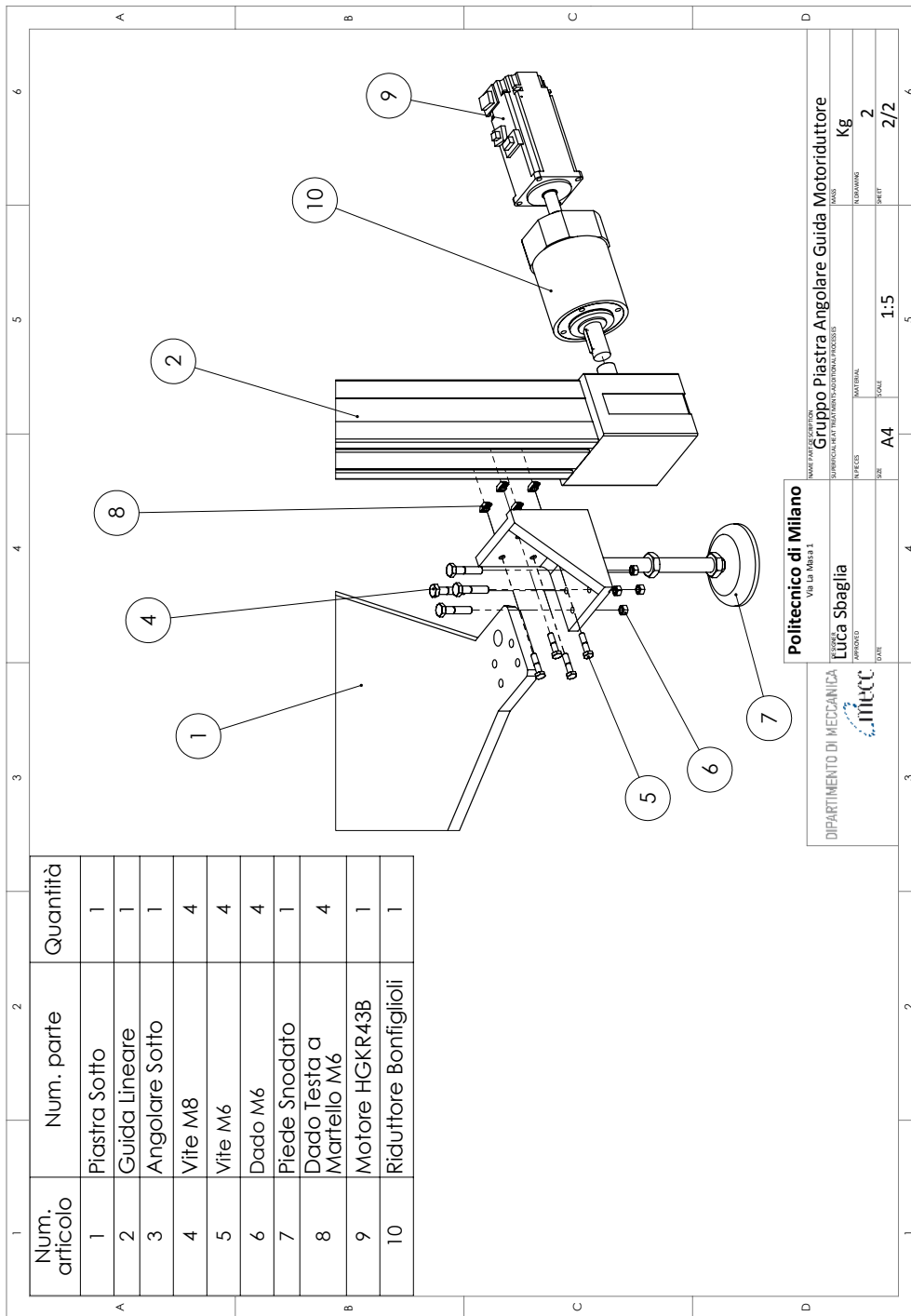


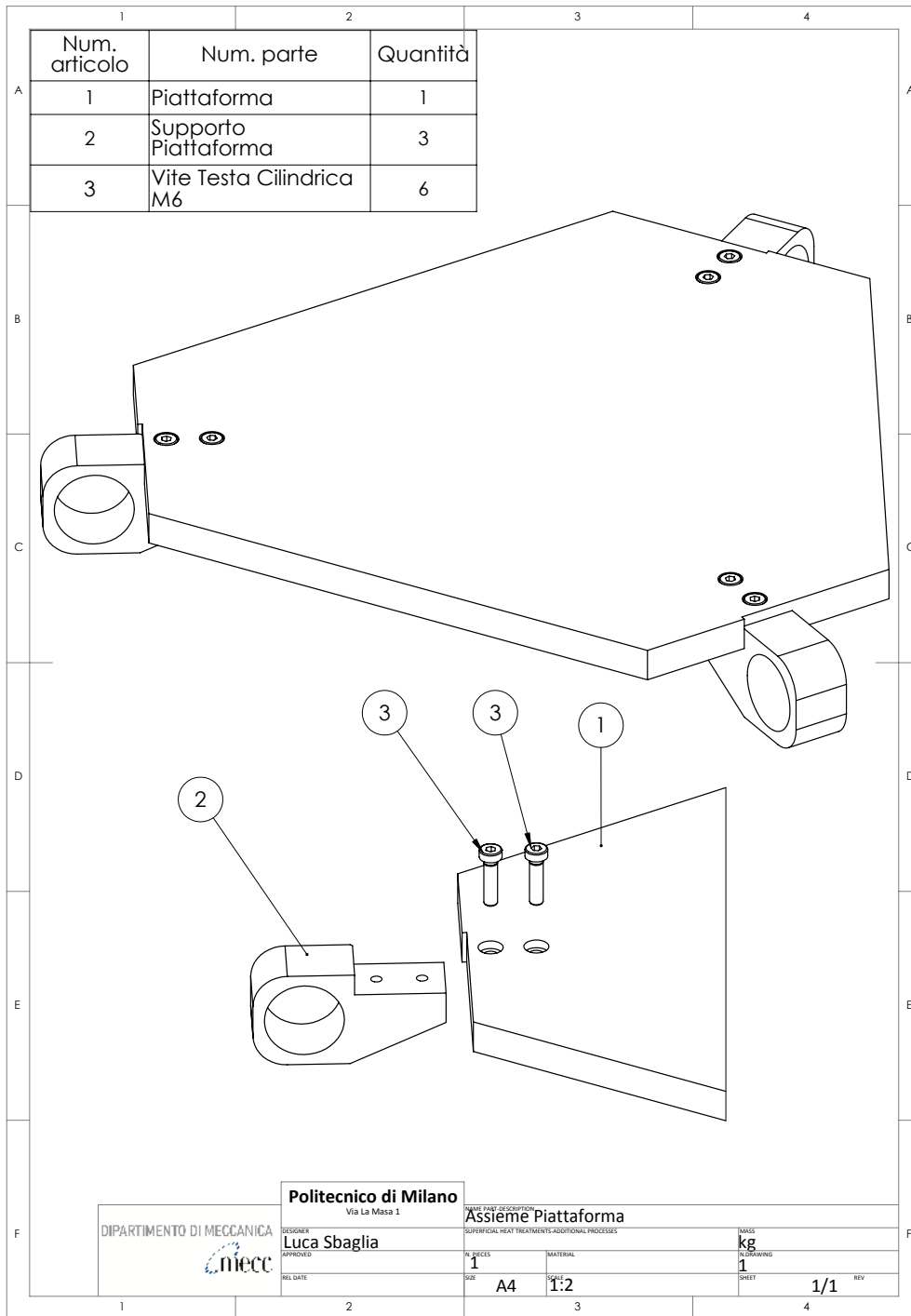


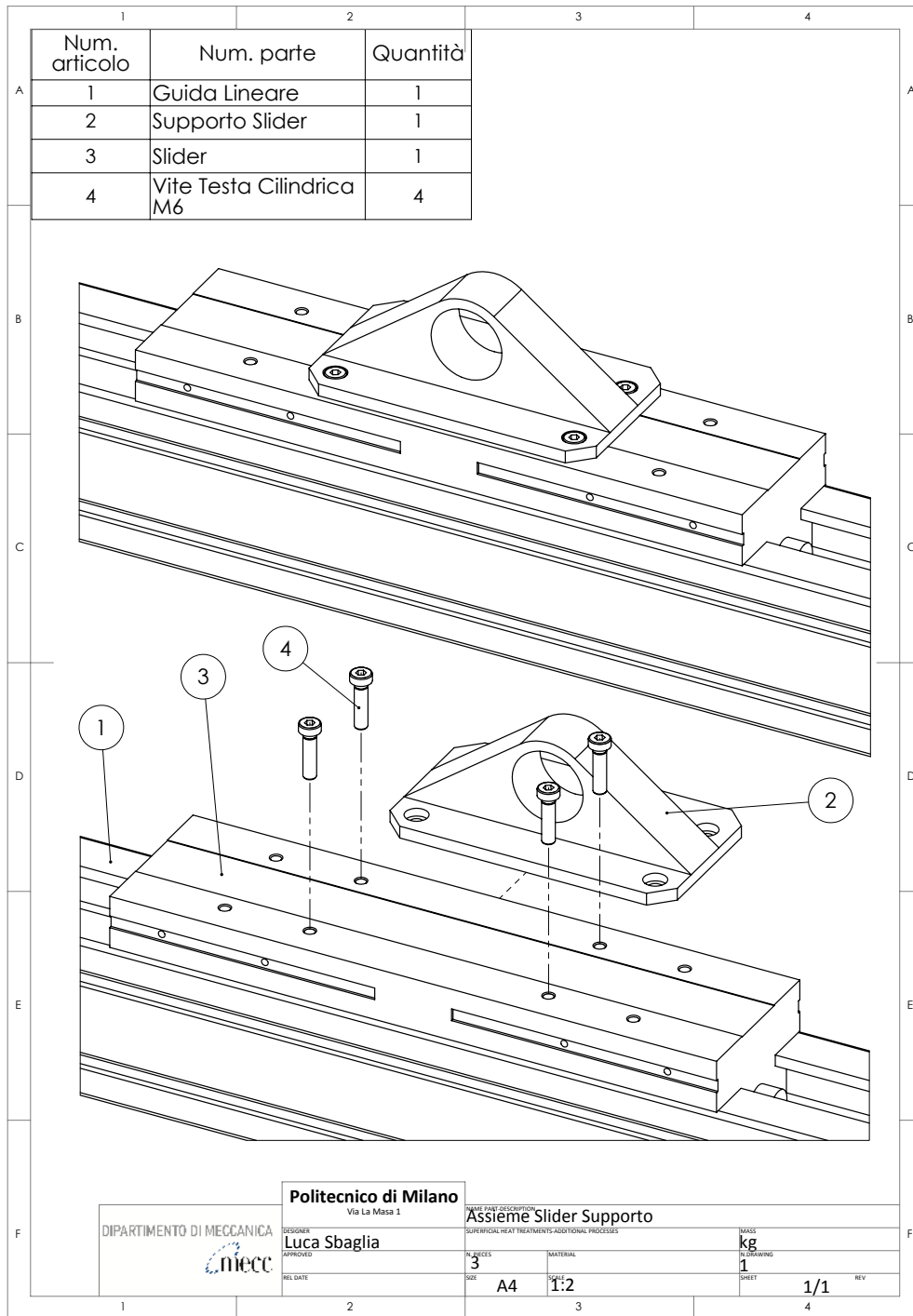


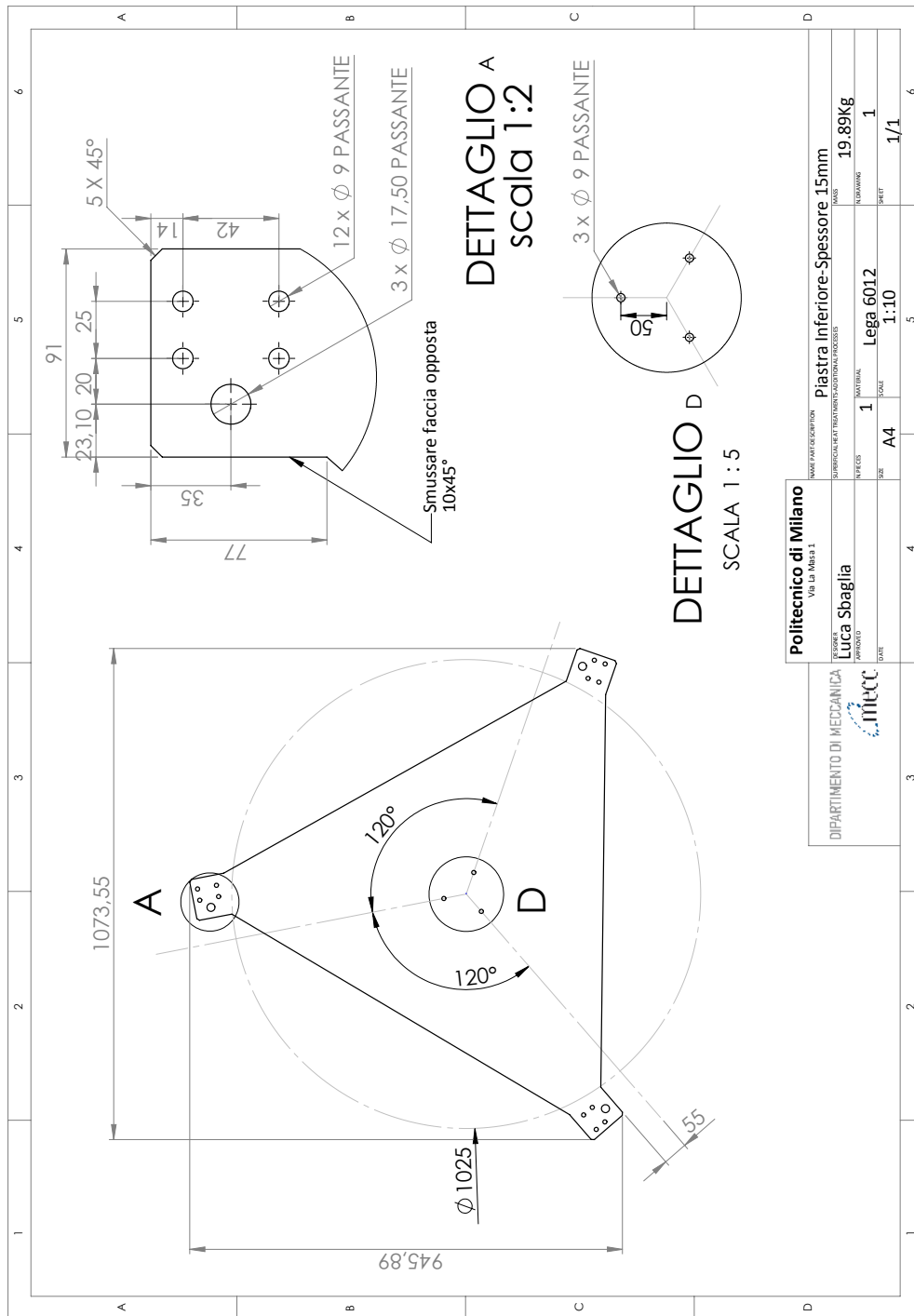












Politecnico di Milano
Via La Madaia 1

DIPARTIMENTO DI MECCANICA
PROFESSORE
Luca Sbaglia
APPROVATO
DATE



NAME PART DESCRIPTION
Piastra Inferiore-Spessore 15mm

SUBMERICAL HEAT TREATMENT AND FINISH PROCESS

MASS

19.89Kg

NUMBERING

1

MATERIAL

Legra 6012

SCALE

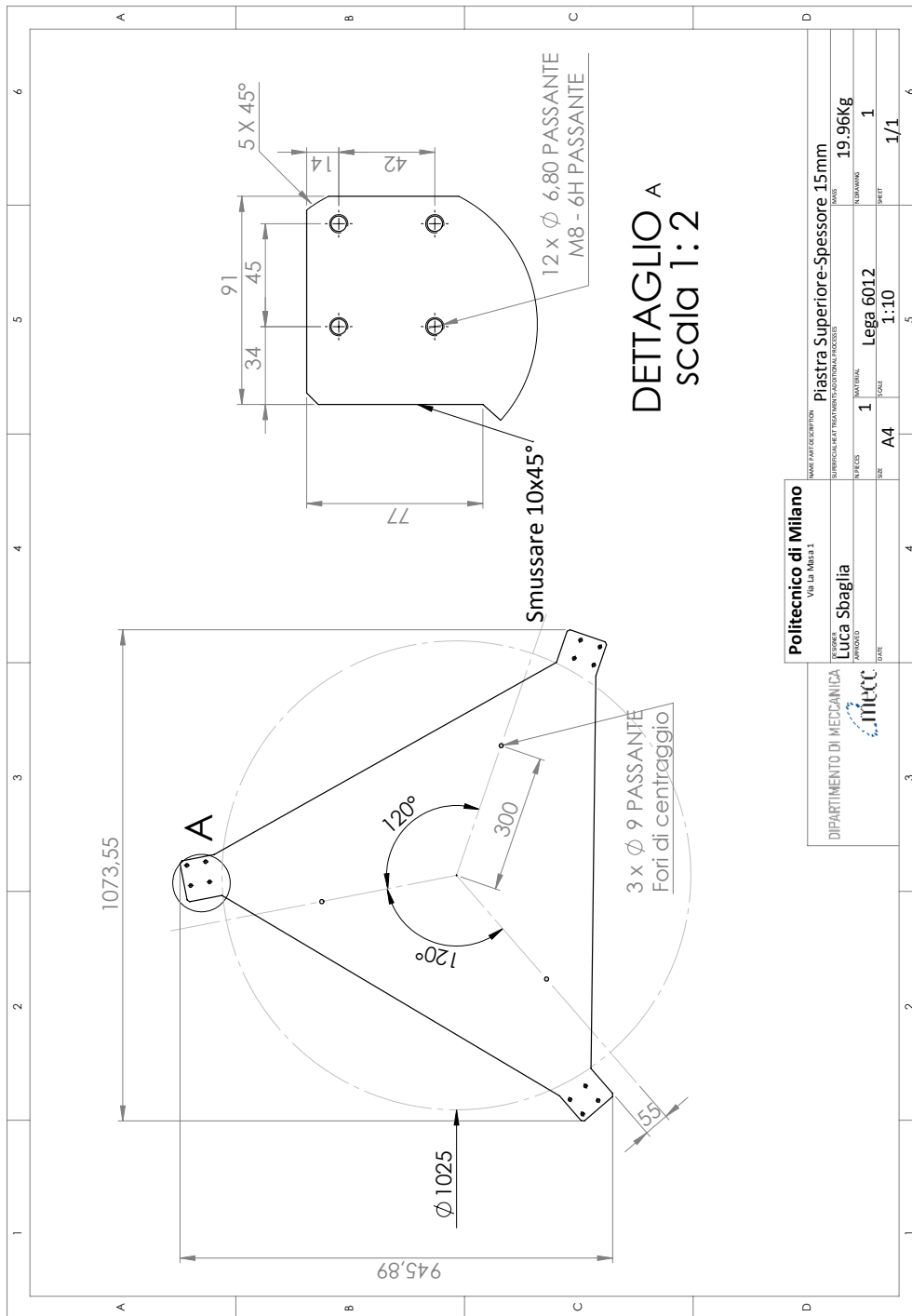
1:10

SIZE

A4

SHEET

1/1



Politecnico di Milano
Via La Maba 1

DIPARTIMENTO DI MECCANICA
TECNICA
Luca Sbaglia
PROFESSORE



NAME PART DESCRIPTION: **Piastra Superiore-Spessore 15mm**

SUBSCRIPTION IDENTIFICATION CODE

WEIGHT: **19,96Kg**

NUMBER OF PARTS: **1**

MATERIAL: **Legna 6012**

SCALE: **1:10**

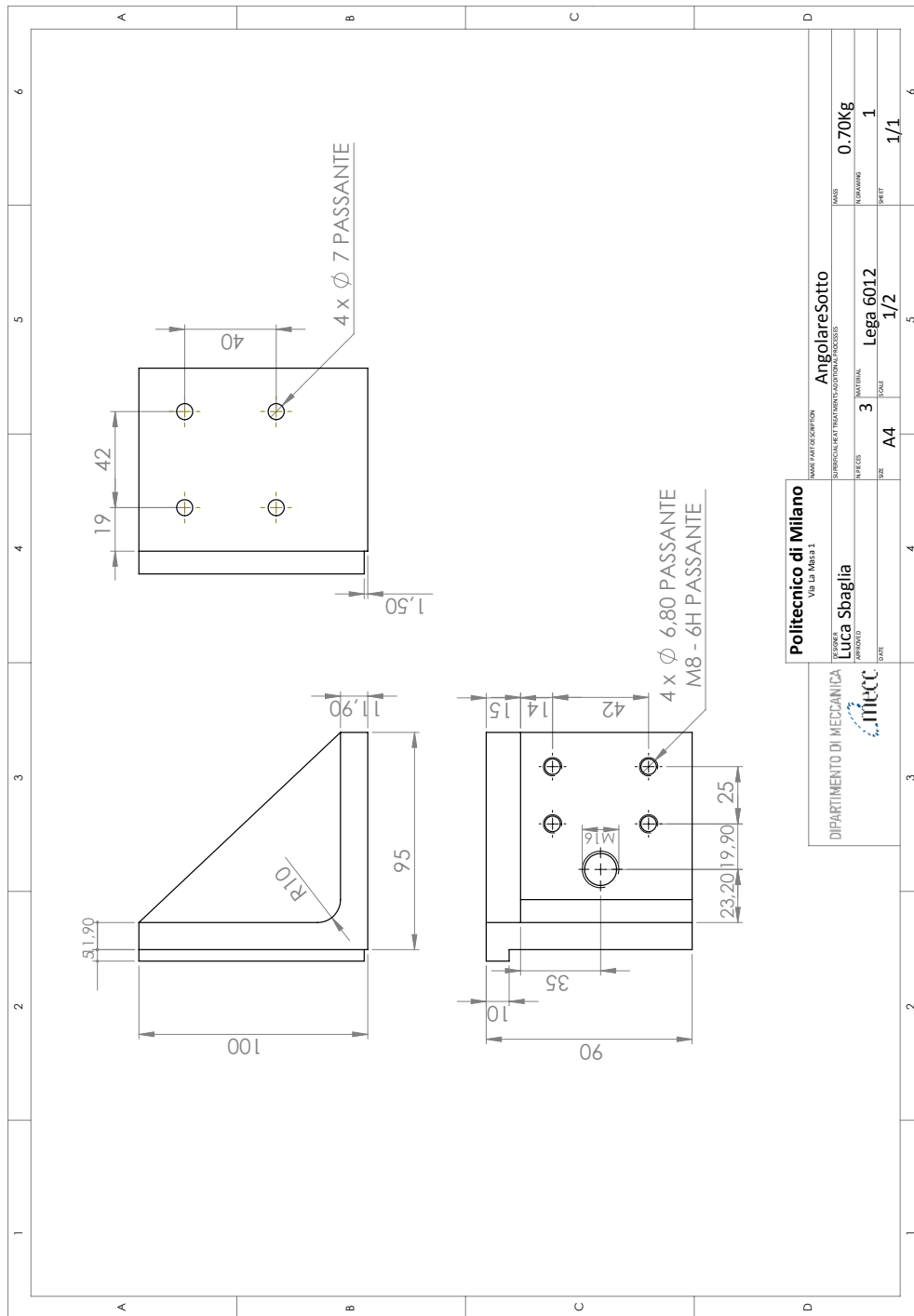
DATE: **1/1**

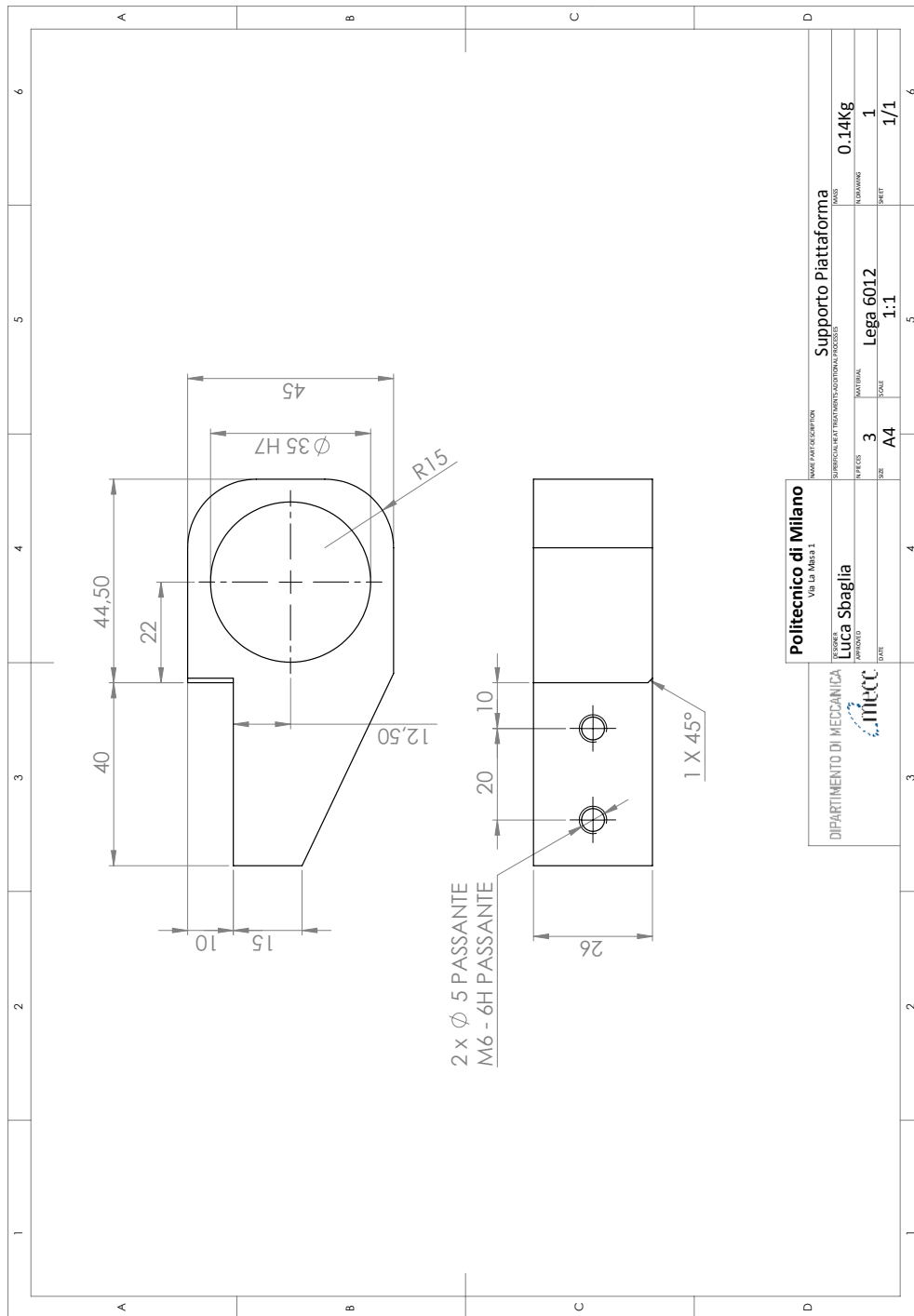
FORM: **A4**

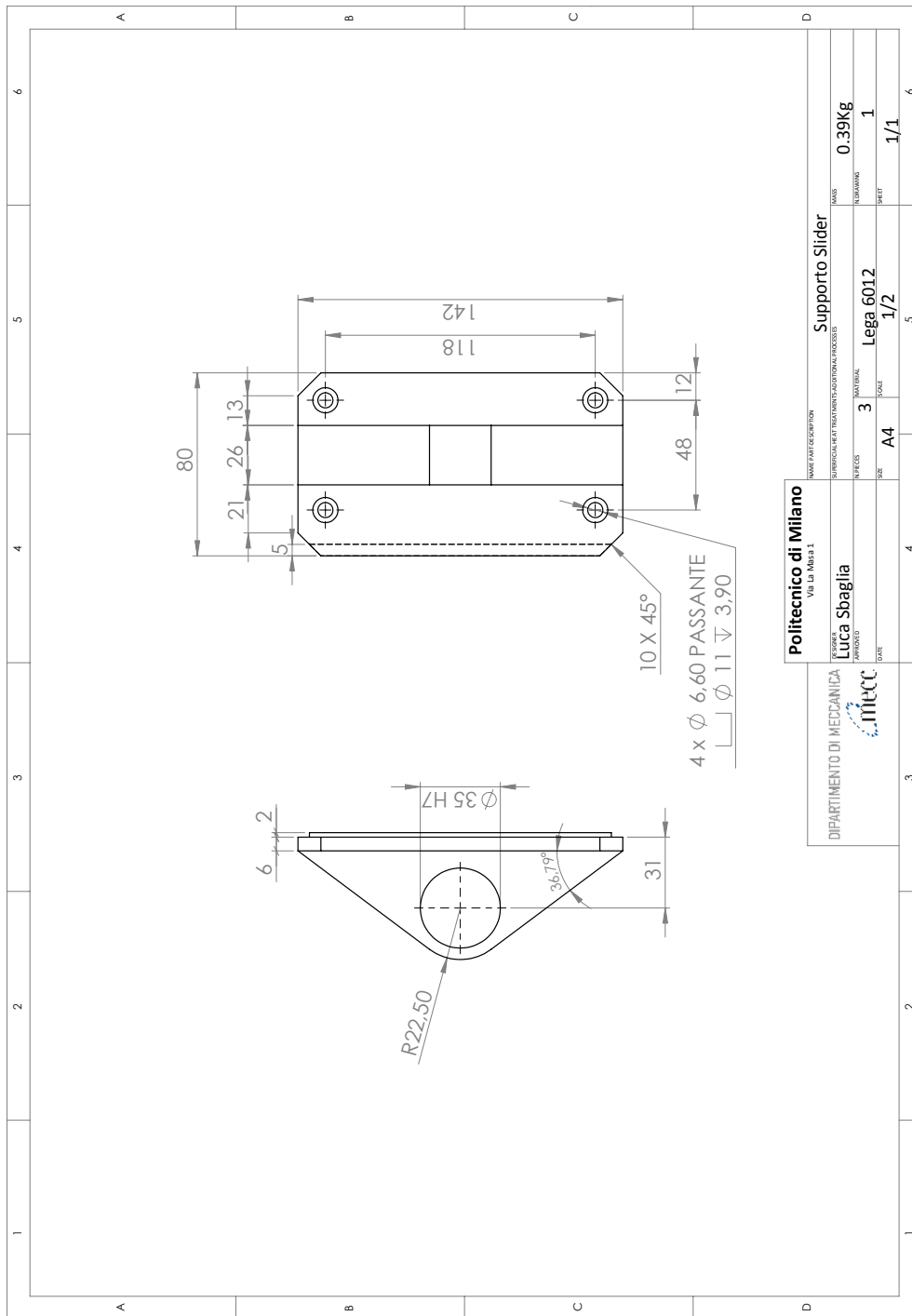
REVISION: **1**

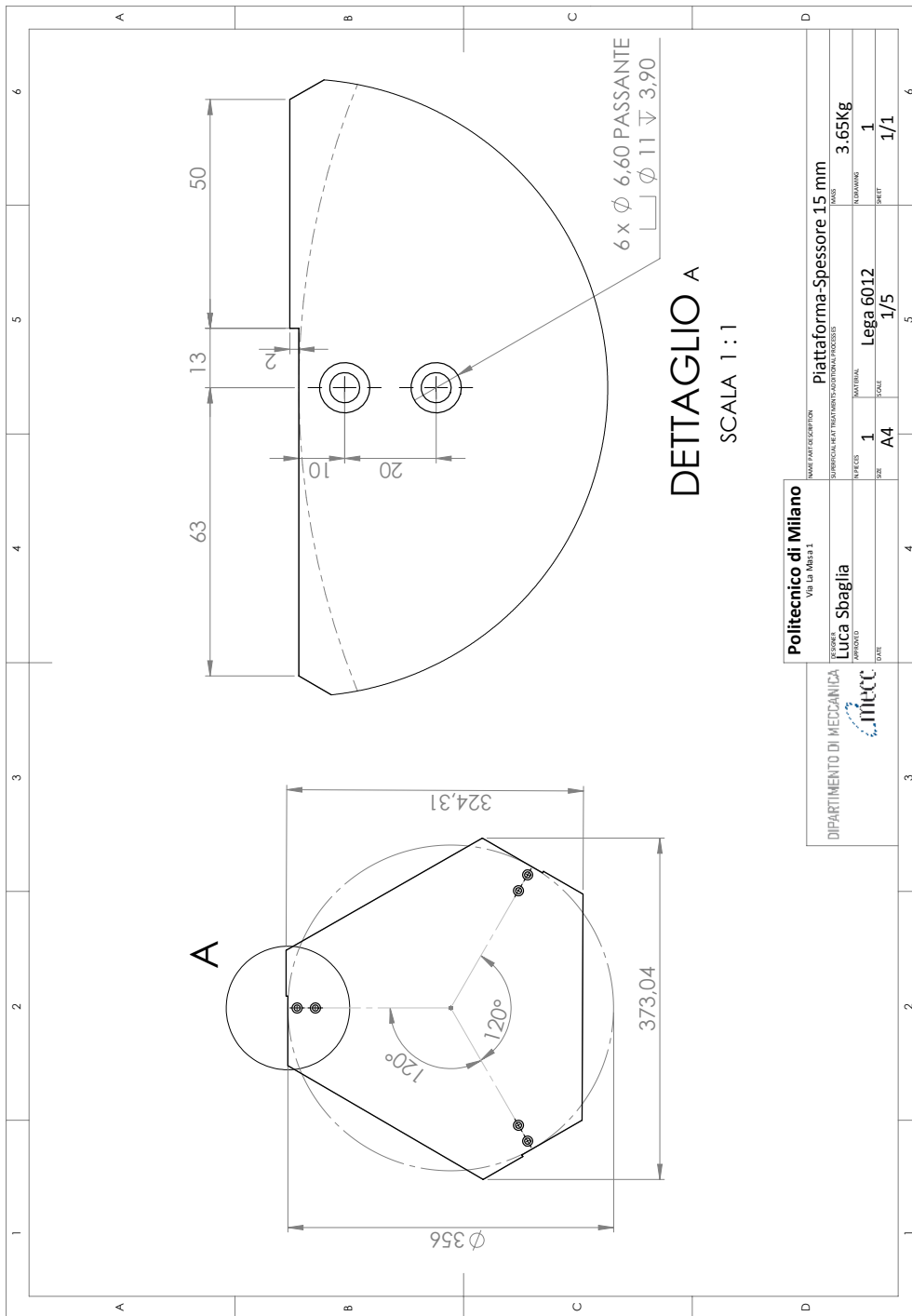
SCALE: **1:10**

DATE: **1/1**









Politecnico di Milano
Via La Medusa 1

DIPARTIMENTO DI MECCANICA
imccc

ESAGGERAZIONE
Luca Sbaglia
APPROVATO
DATE

NAME PART DESCRIPTION
SUBMERICAL HEAT TREATMENT AND OPTICAL PROCESS

PIATTAFORMA-SPESORE 15 mm

MASS 3.65Kg

NUM PARTS 1

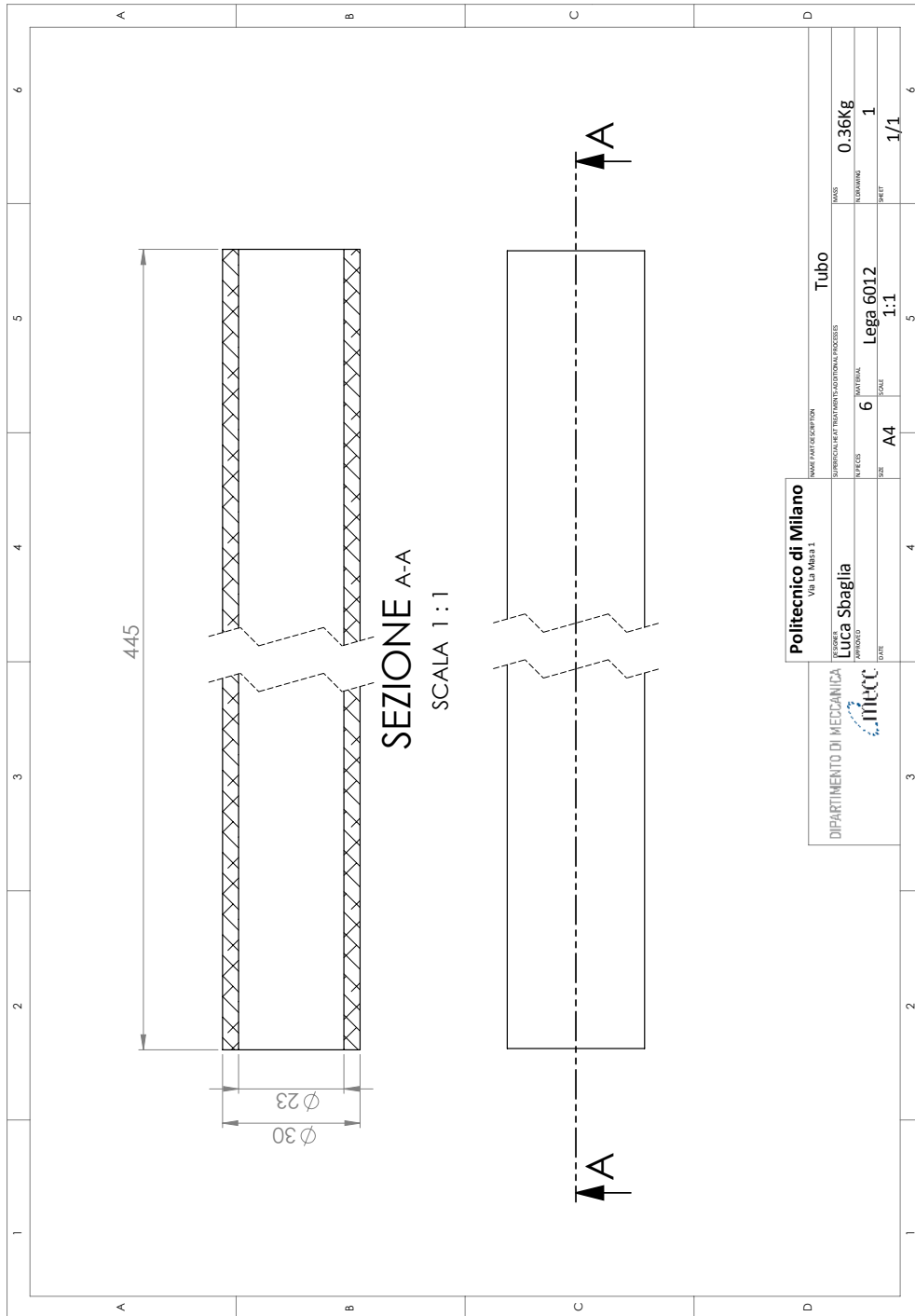
MATERIAL Lega 6012

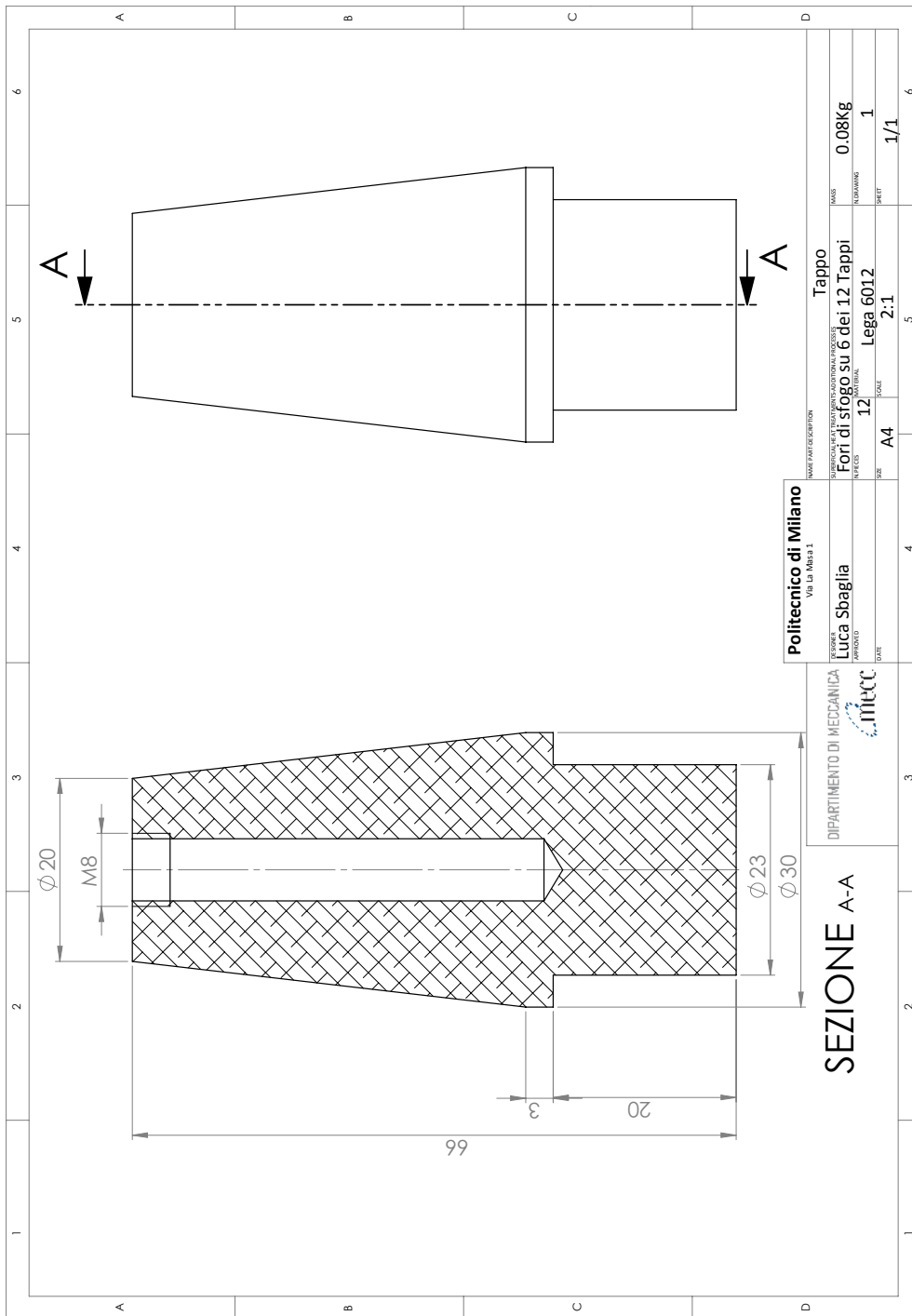
NUM DRAWING 1

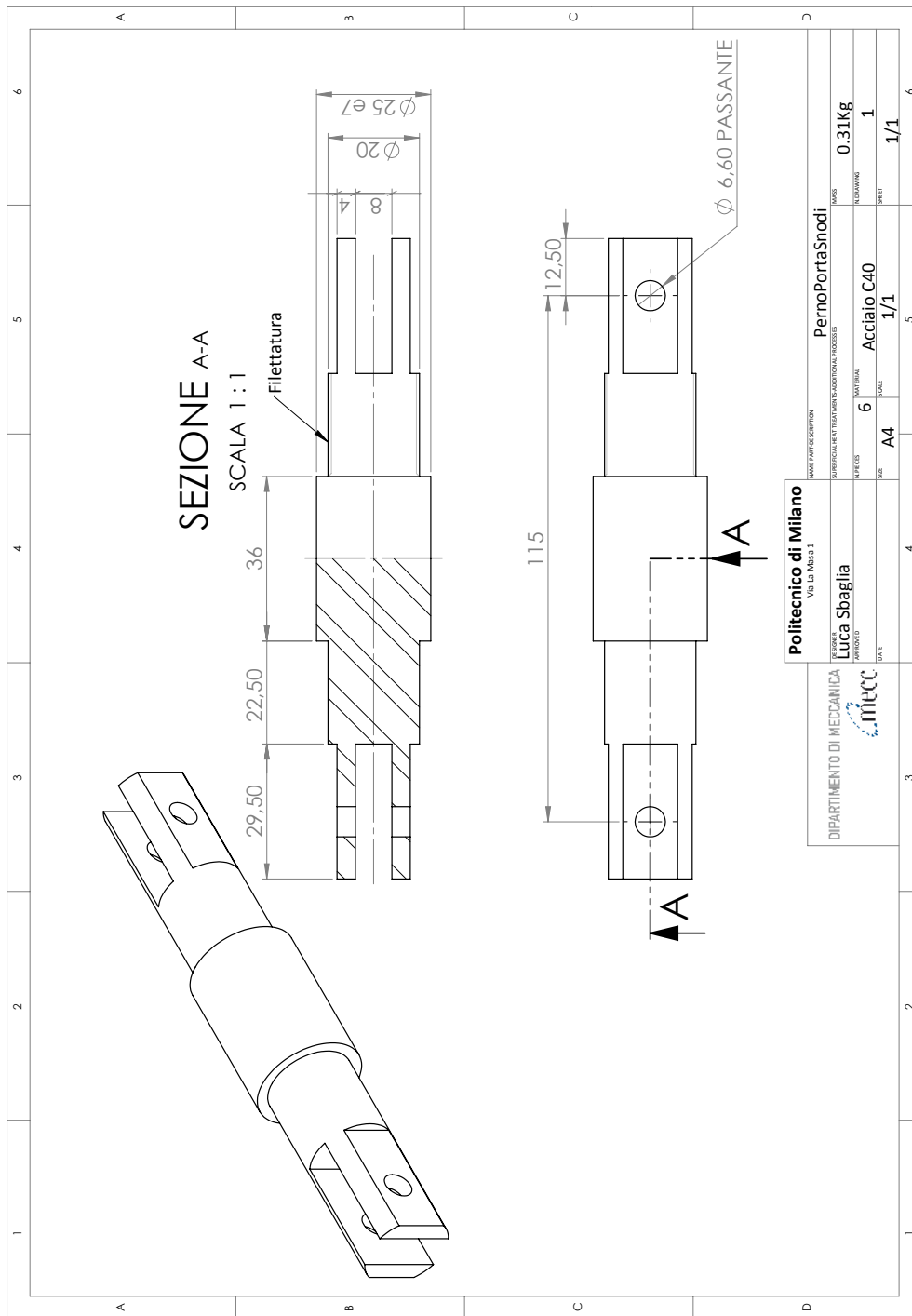
SIZE A4

SCALE 1/5

SHEET 1/1







HG-KR Series (Low Inertia, Small Capacity) Specifications

Servomotor Model HG-KR_		053(B)	13(B)	23(B)	43(B)	73(B)
Servo Amplifier Model	MR-J4- MR-J4W_-	Refer to "Combinations of Servo Motor and Servo Amplifier" in this guide.				
Power Supply Capacity (kVA) (*1)		0.3	0.3	0.5	0.9	1.3
Continuous Running Duty	Rated Output (kW)	5.0	100	200	400	750
	Rated Torque (N•m) (*3)	0.16	0.32	0.64	1.3	2.4
Maximum Torque (N•m)		0.56	1.1	2.2	4.5	8.4
Rated Speed (r/min)		3000				
Maximum Speed (r/min)		6000				
Permissible Instantaneous Speed (r/min)		6900				
Power Rate Continuous Rated Torque (kW/s)	Standard (kW/s)	5.63	13.0	18.3	43.7	45.2
	With Electromagnetic Brake (kW/s)	5.37	12.1	16.7	41.3	41.6
Rated Current (A)		0.9	0.8	1.3	2.6	4.8
Maximum Current (A)		3.2	2.5	4.6	9.1	17.2
Regenerative Braking Frequency (times/min) (*2)	MR-J4- (times/min)	(*4)	(*4)	453	268	157
	MR-J4W_- (times/min)	2540	1370	451	268	393
Moment of Inertia J (x10 ⁻⁴ kg•m ²) [J (oz•in ²)]	Standard	0.0450	0.0777	0.221	0.371	1.26
	With Electromagnetic Brake	0.0472	0.0837	0.243	0.393	1.37
Recommended Load/Motor Inertia Moment Ratio		15 times or less		24 times or less	22 times or less	15 times or less
Speed/Position Detector		Absolute/incremental 22-bit encoder (resolution: 4194304 pulses/rev)				
Oil Seal		None	None (Servo motors with oil seal are available. (HG-KR_J))			
Insulation Class		130 (B)				
Structure		Totally enclosed, natural cooling (IP rating: IP65) (*2)				
Environment	Ambient Temperature	0 °C to 40 °C (non-freezing), storage: -15 °C to 70 °C (non-freezing)				
	Ambient Humidity	80% RH maximum (non-condensing), storage: 90% RH maximum (non-condensing)				
	Atmosphere	Indoors (no direct sunlight); no corrosive gas, inflammable gas, oil mist or dust				
	Elevation / Vibration (*5)	1000 m or less above sea level; X: 49 m/s ² Y: 49 m/s ²				
Vibration Rank		V10 (*6)				
Permissible Load for the Shaft (*5)	L (mm)	25	25	30	30	40
	Radial (N)	88	88	245	245	392
	Thrust (N)	59	59	98	98	147
	Standard	0.34	0.54	0.91	1.4	2.8
Weight kg	Standard	0.34	0.54	0.91	1.4	2.8
	With Electromagnetic Brake	0.54	0.74	1.3	1.8	3.8

Notes:

- Contact your local sales office if the load to motor inertia ratio exceeds the value in the table.
- The shaft-through portion is excluded. IP67 for the servo motor with oil seal. Equivalent to IP44 for the reducer portion on the geared servo motor. Refer to this guide for the shaft-through portion.
- When unbalanced torque is generated, such as in a vertical lift machine, it is recommended that the unbalanced torque of the machine be kept under 70% of the servo motor rated torque.
- When the servo motor decelerates to a stop from the rated speed, the regenerative frequency will not be limited if the effective torque is within the rated torque range.
 - + HG-KR053(B): The load to motor inertia ratio is 8 times or less, and the effective torque is within the rated torque range.
 - + HG-KR13(B): The load to motor inertia ratio is 4 times or less, and the effective torque is within the rated torque range.
- The vibration direction is shown in the diagram below. The numeric value indicates the maximum value of the component (commonly the bracket in the opposite direction of the motor shaft). Fretting of the bearing occurs easily when the motor stops, so maintain vibration to approximately one-half of the allowable value.



- Refer to the MR-J4 Servo Amplifier and Motors brochure for more detailed specifications.

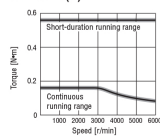
HG-KR Series Electromagnetic Brake Specifications (*1)

Servomotor Model HG-KR_		053B	13B	23B	43B	73B
Type		Spring actuated type safety brake				
Rated Voltage		24 VDC ⁻¹⁰ 0%				
Power Consumption (W) at 20 °C		6.3	6.3	7.9	7.9	10
Electromagnetic Brake Static Friction Torque (N•m)		0.32	0.32	1.3	1.3	2.4
Permissible Braking Work	Per Braking (J)	5.6	5.6	22	22	64
	Per Hour (J)	56	56	220	220	640
Electromagnetic Brake Life (*2)	Number of Times (Times)	20000				
	Work Per Braking (J)	5.6	5.6	22	22	64

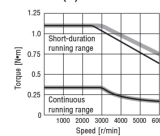
Notes:

- The electromagnetic brake is for holding. It should not be used for deceleration applications.
- Brake gap is not adjustable. Electromagnetic brake life is defined as the time period until the readjustment is needed.

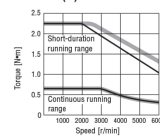
HG-KR053(B) (*1, *2)



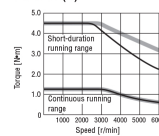
HG-KR13(B) (*1, *2)



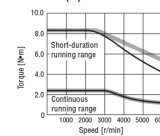
HG-KR23(B) (*1, *2)



HG-KR43(B) (*1, *2)



HG-KR73(B) (*1, *2)



- Notes: 1. —: For 3-phase 200 VAC or 1-phase 230 VAC.
 2. —: For 1-phase 200 VAC.
 3. Torque drops when the power supply voltage is below the specified value.

B.3 Dati Tecnici Guida Lineare ELM 80-SP

12 ELM 80 SP - ELM 80CI

ELM 80 SP - Con guide standard a ricircolo di sfere
ELM 80 CI - Con guide a rotelle ad arco gotico

ELM 80 SP - With standard ball bearings guide
ELM 80 CI - With lancet arch bearing guides

Dati tecnici

Technical data

	ELM 80 SP	ELM 80 CI
Lunghezza corsa utile min. [mm] - <i>Min. useful stroke length [mm]</i>	100	100
Lunghezza corsa utile max. [mm] - <i>Max. useful stroke length [mm]</i>	6000*1	6000*1
Ripetibilità max. di posizionamento [mm] *2 - <i>Max. positioning repeatability [mm] *2</i>	0,05	0,05
Velocità max. di traslazione [m/s] - <i>Max. speed [m/s]</i>	5,0	1,5
Accelerazione max. [m/s ²] - <i>Max. acceleration [m/s²]</i>	50	1,5
Tipo di cinghia - <i>Type of belt</i>	32 AT 10	32 AT 10
Tipo di puleggia - <i>Type of pulley</i>	Ø 60 - Z 19 - Gioco 0	Ø 60 - Z 19 - Gioco 0
Spostamento carro per giro puleggia [mm] - <i>Carriage displacement per pulley turn [mm]</i>	190	190
Peso del carro [kg] - <i>Carriage weight [kg]</i>	2,7	2,5
Peso corsa zero [kg] - <i>Zero travel weight [kg]</i>	10,5	9,5
Peso per ogni 100 mm di corsa utile [kg] - <i>Weight for 100 mm useful stroke [kg]</i>	1,0	0,8

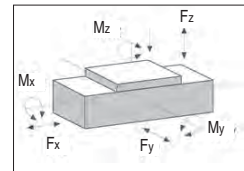
*1) È possibile realizzare corse fino a 11000 mm tramite speciali giunzioni Rollon
 *1) It is possible to obtain strokes up to 11000 mm by means of special Rollon joints

*2) La ripetibilità di posizionamento dipende dal tipo di trasmissione applicato
 *2) The positioning repeatability depends upon the type of transmission used

ELM 80 - Carichi teorici massimi e consigliati / ELM 80 - Theoric and maximum permissible loads

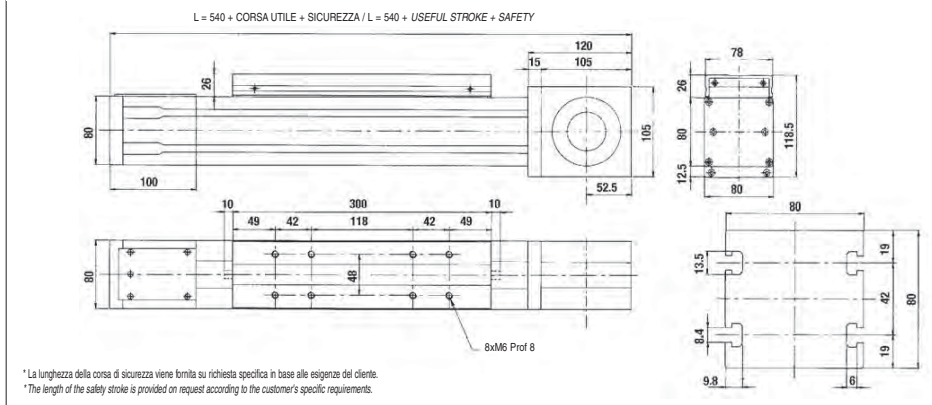
ELM 80 SP	Teorico - Theoric		Consigliato - Permissible*		ELM 80 CI	Teorico - Theoric		Consigliato - Permissible*	
	stat	din. / dyn.	stat	din. / dyn.		stat	din. / dyn.	stat	din. / dyn.
Fx [N]	2230	1670	1780	1340	Fx [N]	2230	1670	1780	1340
Fy [N]	43400	34800	8680	4180	Fy [N]	8500	17000	1700	1700
Fz [N]	43400	34800	8680	4180	Fz [N]	4740	8700	950	950
Mx [Nm]	620	480	120	58	Mx [Nm]	140	250	28	28
My [Nm]	3170	2540	630	300	My [Nm]	390	710	78	78
Mz [Nm]	3170	2540	630	300	Mz [Nm]	700	1390	140	140

*) Con i valori riportati si ottengono una ragionevole durata ed una sufficiente sicurezza statica.
 *) Reasonable operating life and system rigidity can be obtained from the values given.



Dimensioni ELM 80 SP - ELM 80 CI

ELM 80 SP - ELM 80 CI dimensions



* La lunghezza della corsa di sicurezza viene fornita su richiesta specifica in base alle esigenze del cliente.
 * The length of the safety stroke is provided on request according to the customer's specific requirements.

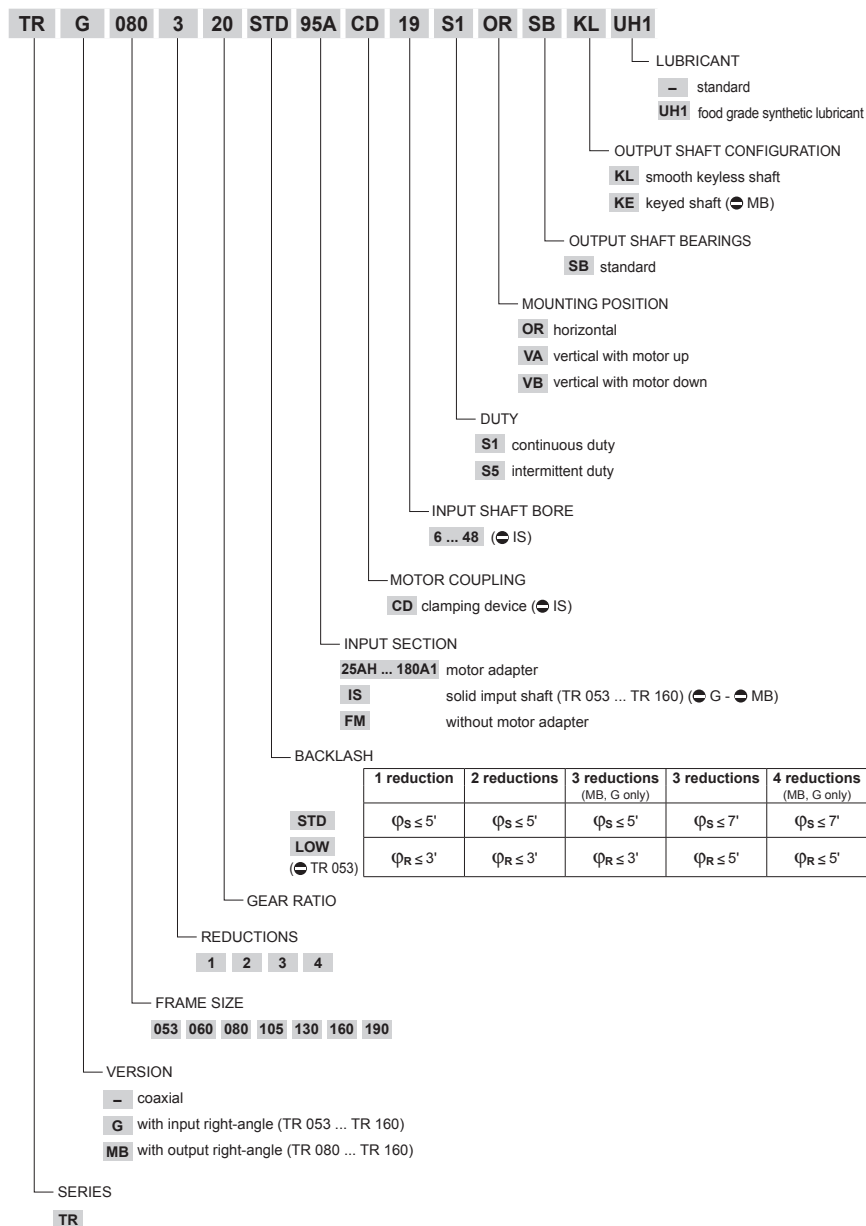
© All the drawings in this catalogue are available in CAD files on www.rollon.com

B.4 Dati Tecnici Riduttore TR 080 1 10 LOW 50C1 CD14 S5 OR SB KE



4.1 ORDERING CODE

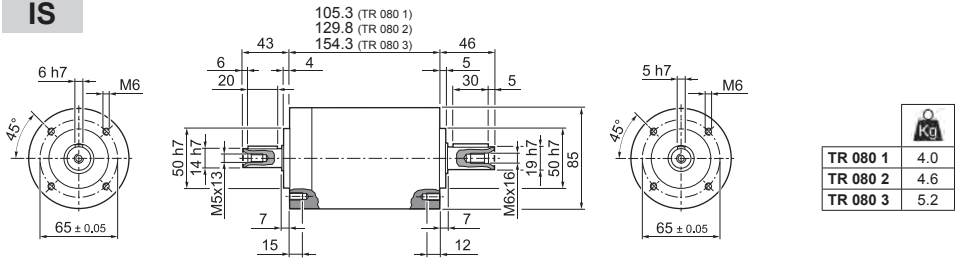
TR






TR 080

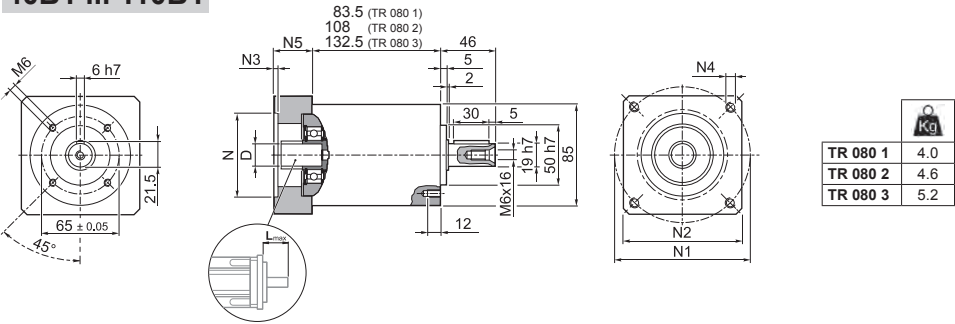
IS






	 Kg
TR 080 1	4.0
TR 080 2	4.6
TR 080 3	5.2

TR

40B1 ... 110B1



	 Kg
TR 080 1	4.0
TR 080 2	4.6
TR 080 3	5.2

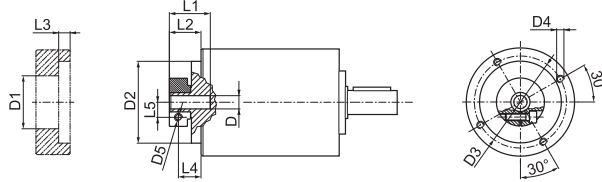
											N	N1	N2	N3	N4	N5	L _{max}		
40B1	8	9	9.52	11	12	12.7	14	-	-	-	-	40	63	80	4	M4x12	34	40	
45A	8	9	9.52	11	12	12.7	-	-	-	-	-	45	63	80	4	M4x12	34	40	
50B1	8	9	9.52	11	12	12.7	14	-	-	-	-	50	65	80	4	M5x16	34	40	
50BH1	8	9	9.52	11	12	12.7	14	-	-	-	-	50	65	80	4	5.5	34	40	
50C1	8	9	9.52	11	12	12.7	14	-	-	-	-	50	70	80	4	M4x10	34	40	
50D	8	9	9.52	11	12	12.7	14	-	-	-	-	50	95	80	4	M6x20	34	40	
55A	8	9	9.52	11	12	12.7	14	15.875	16	17	19	19.05	55.5	125.7	105	4	M6x20	34	40
60A2	8	9	9.52	11	12	12.7	14	-	-	-	-	60	75	80	4	M5x16	34	40	
60AH2	8	9	9.52	11	12	12.7	14	-	-	-	-	60	75	90	4	6.5	34	40	
60B1	8	9	9.52	11	12	12.7	14	15.875	16	-	-	60	85	80	4	M5x16	34	40	
60C1	8	9	9.52	11	12	12.7	14	15.875	16	-	-	60	90	80	4	M5x16	34	40	
70A1	8	9	9.52	11	12	12.7	14	15.875	16	17	19	19.05	70	85	80	4	M6x20	34	40
70AH1	8	9	9.52	11	12	12.7	14	15.875	16	17	19	19.05	70	85	90	4	6.5	34	40
70B1	8	9	9.52	11	12	12.7	14	15.875	16	17	19	19.05	70	90	80	4	M5x16	34	40
73A1	8	9	9.52	11	12	12.7	14	-	-	-	-	73	98.4	85	4	M5x16	34	40	
80A1	8	9	9.52	11	12	12.7	14	15.875	16	17	19	19.05	80	100	90	4	M6x16	34	40
95A	8	9	9.52	11	12	12.7	14	15.875	16	17	19	19.05	95	115	100	4	M8x20	34	40
95B	8	9	9.52	11	12	12.7	14	15.875	16	17	19	19.05	95	130	115	4	M8x20	34	40
110A	8	9	9.52	11	12	12.7	14	15.875	16	17	19	19.05	110	130	115	4	M8x20	34	40
110B	8	9	9.52	11	12	12.7	14	15.875	16	17	19	19.05	110	145	120	6.5	M8x20	44	50
110B1	8	9	9.52	11	12	12.7	14	15.875	16	17	19	19.05	110	145	120	6.5	M8x20	54	60

Please contact us for other motor adapters and input shaft bore.



TR 080

FM



D				D1	D2	D3	D4	D5	L1	L2	L3	L4	L5
8	9	9.52		38	68	76.5	M6x12	M6	32.2	26.3	9.5	19.3	10.5
11	12	12.7		43	68	76.5	M6x12	M6	32.2	26.3	9.5	19.3	12.5
14	15.875	16	17	48	68	76.5	M6x12	M6	32.2	26.3	9.5	19.3	14.5
19	19.05			51	68	76.5	M6x12	M6	32.2	26.3	9.5	19.3	16.5

i	M _{n 2} [Nm]	M _{a 2} [Nm]	M _{p 2} [Nm]	n ₁ [min ⁻¹]	n _{1 max} [min ⁻¹]	φ _S [arcmin]	φ _R [arcmin]	C _t [Nm/arcmin]	R _{1 max} [N]	R _{2 max} [N]	A _{2 max} [N]	η %	J _G [kgcm ²]	
													8 ... 12.7	14 ... 19.05
TR 080 1_3	40	80	180	3500	3500	5'	3'	8.0	400	2500	3000	97	0.50	0.59
TR 080 1_4	50	80	200	4500	4500	5'	3'	8.0	400	2500	3000	97	0.34	0.43
TR 080 1_5	50	80	200	4500	4500	5'	3'	8.0	400	2500	3000	97	0.28	0.37
TR 080 1_6	50	80	200	4500	4500	5'	3'	8.0	400	2500	3000	97	0.21	0.30
TR 080 1_7	50	80	200	6000	6000	5'	3'	8.0	400	2500	3000	97	0.23	0.32
TR 080 1_10	40	80	180	6000	6000	5'	3'	8.0	400	2500	3000	97	0.20	0.29
TR 080 2_9	40	80	180	3500	3500	5'	3'	6.5	400	2500	3000	94	0.49	0.58
TR 080 2_12	70	100	250	3500	3500	5'	3'	6.5	400	2500	3000	94	0.47	0.56
TR 080 2_15	70	100	250	3500	3500	5'	3'	6.5	400	2500	3000	94	0.46	0.55
TR 080 2_16	70	100	250	4500	4500	5'	3'	6.5	400	2500	3000	94	0.32	0.41
TR 080 2_20	70	100	250	4500	4500	5'	3'	6.5	400	2500	3000	94	0.27	0.36
TR 080 2_25	70	100	250	4500	4500	5'	3'	6.5	400	2500	3000	94	0.27	0.36
TR 080 2_28	70	100	250	6000	6000	5'	3'	6.5	400	2500	3000	94	0.22	0.31
TR 080 2_30	40	80	180	6000	6000	5'	3'	6.5	400	2500	3000	94	0.20	0.29
TR 080 2_35	70	100	250	6000	6000	5'	3'	6.5	400	2500	3000	94	0.22	0.31
TR 080 2_36	50	80	200	4500	4500	5'	3'	6.5	400	2500	3000	94	0.20	0.29
TR 080 2_40	70	100	250	6000	6000	5'	3'	6.5	400	2500	3000	94	0.20	0.29
TR 080 2_50	70	100	250	6000	6000	5'	3'	6.5	400	2500	3000	94	0.19	0.28
TR 080 2_70	70	100	250	6000	6000	5'	3'	6.5	400	2500	3000	94	0.19	0.28
TR 080 2_100	40	80	180	6000	6000	5'	3'	6.5	400	2500	3000	94	0.19	0.28
TR 080 3_48	70	100	250	4500	4500	7'	5'	5.5	400	2500	3000	91	0.33	0.42
TR 080 3_64	70	100	250	4500	4500	7'	5'	5.5	400	2500	3000	91	0.32	0.41
TR 080 3_75	70	100	250	4500	4500	7'	5'	5.5	400	2500	3000	91	0.27	0.36
TR 080 3_80	70	100	250	4500	4500	7'	5'	5.5	400	2500	3000	91	0.32	0.41
TR 080 3_84	70	100	250	6000	6000	7'	5'	5.5	400	2500	3000	91	0.23	0.32
TR 080 3_90	40	80	180	6000	6000	7'	5'	5.5	400	2500	3000	91	0.20	0.29
TR 080 3_120	70	100	250	6000	6000	7'	5'	5.5	400	2500	3000	91	0.20	0.29
TR 080 3_125	70	100	250	4500	4500	7'	5'	5.5	400	2500	3000	91	0.27	0.36
TR 080 3_140	70	100	250	6000	6000	7'	5'	5.5	400	2500	3000	91	0.22	0.31
TR 080 3_150	70	100	250	6000	6000	7'	5'	5.5	400	2500	3000	91	0.20	0.29
TR 080 3_160	70	100	250	6000	6000	7'	5'	5.5	400	2500	3000	91	0.20	0.29
TR 080 3_175	70	100	250	6000	6000	7'	5'	5.5	400	2500	3000	91	0.22	0.31
TR 080 3_200	70	100	250	6000	6000	7'	5'	5.5	400	2500	3000	91	0.20	0.29
TR 080 3_210	70	100	250	6000	6000	7'	5'	5.5	400	2500	3000	91	0.20	0.29
TR 080 3_216	70	100	250	4500	4500	7'	5'	5.5	400	2500	3000	91	0.20	0.29
TR 080 3_250	70	100	250	6000	6000	7'	5'	5.5	400	2500	3000	91	0.19	0.28
TR 080 3_280	70	100	250	6000	6000	7'	5'	5.5	400	2500	3000	91	0.19	0.28
TR 080 3_350	70	100	250	6000	6000	7'	5'	5.5	400	2500	3000	91	0.19	0.28
TR 080 3_400	70	100	250	6000	6000	7'	5'	5.5	400	2500	3000	91	0.19	0.28
TR 080 3_500	70	100	250	6000	6000	7'	5'	5.5	400	2500	3000	91	0.19	0.28
TR 080 3_700	70	100	250	6000	6000	7'	5'	5.5	400	2500	3000	91	0.19	0.28
TR 080 3_1000	40	80	180	6000	6000	7'	5'	5.5	400	2500	3000	91	0.19	0.28

TR

BIBLIOGRAFIA

- [1] A. Dolenc, *An Overview Of Rapid Prototyping Technologies In Manufacturing*, 1994, Istituto dell'automazione industriale dell'università della tecnologia di Helsinki
- [2] Douglas R. Gress, Ronald V. Kalafsky, *Geographies of production in 3D: Theoretical and research implications stemming from additive manufacturing*, Geoforum, Vol.60, March 2015, Pages 43-52
- [3] William E. Frazier, *Metal Additive Manufacturing: A Review*, JMEPEG (2014) 23:1917–1928
- [4] Nannan GUO, Ming C. LEU, *Additive manufacturing: technology, applications and research needs*, Front. Mech. Eng. 2013, 8(3): 215–243
- [5] John R. Tumbleston, David Shirvanyants, Nikita Ermoshkin, Rima Januszewicz, Ashley R. Johnson, David Kelly, Kai Chen, Robert Pinschmidt, Jason P. Rolland, Alexander Ermoshkin, Edward T. Samulski, Joseph M. DeSimone, *Continuous liquid interface production of 3D objects*, journal Science 2015, Volume 347, numero 6228, pagine 1349-1352
- [6] Wei-chen Lee, Ching-chih Wei, Shan-Chen Chung Department, *Development of a hybrid rapid prototyping system using low-cost fused deposition modeling and five-axis machining*, Journal of Materials Processing Technology 214 (2014) 2366–2374
- [7] Steven Keating, Neri Oxmann, *Compound fabrication: A multi-functional robotic platform for digital design and fabrication*, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 29 (2013) 439–448
- [8] US Patent 4929402, data 29/05/1990, assignee 3D Systems Inc., *method for production of three dimensional objects by stereolithography*
- [9] US Patent Application, US2003/0127436 A1, assignee 3D Systems Inc., *Selective laser Sintering with optimized raster scan direction*
- [10] International Application PCT, WO 89/10254, data pubblicazione 2/11/1989, applicant 3D Systems Inc., *Stereolithographic supports*
- [11] US Patent publication, US2010/0288 A1, data pubblicazione 18/11/2010, assignee 3D Systems Inc., *Composition and methods for selective deposition modeling*
- [12] Stratasys, *Rapid Prototyping Using FDM: A Fast, Precise, Safe Technology*, Solid Freeform Fabrication Symposium August 3-5, 1992

- [13] US Patent 5340433, data 23/08/1994, assignee Stratasys Inc., *modeling apparatus for three-dimensional objects*
- [14] US Patent application, US2009/0314391 A1, data pubblicazione 24/12/2009, assignee Stratasys Inc., *System and method for building three-dimensional object with metal based alloys*
- [15] US Patent application, US2013/0078073 A1, data pubblicazione 28/03/2013, assignee Stratasys Inc., *Gantry assembly for use in additive manufacturing system*
- [16] US Patent application, US2010/0140849 A1, data pubblicazione 10/06/2010, assignee Stratasys Inc., *Extrusion-based layered deposition systems using selective radiation exposure*
- [17] US Patent application, US2013/0004607 A1, data pubblicazione 03/01/2013, assignee Prometal Rct GmbH, *Construction box for a rapid prototyping system*
- [18] Brevetto Tedesco, numero pubblicazione DE 20 2006 010 327 U1, detentore Prometal RCT GmbH, *Gebrauchsmusterschrift*
- [19] US Patent application, US2015/0088295 A1, data pubblicazione 26/03/2015, applicant Arcam AB, *Method for additive Manufacturing*
- [20] International Application PCT, WO 2005/107981 A2, data pubblicazione 17/11/2005, applicant Optomec Design Company, *Greater angle and overhanging materials deposition*
- [21] Brian N. Turner, Robert Strong and Scott A. Gold, (2014) *A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling*, Rapid Prototyping Journal, Vol. 20 Iss 3 pp. 192 - 204
- [22] A.L. Cooke, J.A. Soons, *Variability in the Geometric Accuracy of Additively Manufactured Test Parts*, 21st Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference, SFF 2010, Pages 1-12
- [23] Mukesh K. Agarwala Vikram R. Jamalabad Noshir A. Langrana Ahmad Safari Philip J. Whalen Stephen C. Danforth, (1996), *Structural quality of parts processed by fused deposition*, Rapid Prototyping Journal, Vol. 2 Iss 4 pp. 4 - 19
- [24] A. Boschetto, L. Bottini, *Accuracy prediction in fused deposition modeling*, International Journal Advanced Manufacturing Technology (2014) 73:913–928
- [25] A. Boschetto, V. Giordano, F. Veniali, *Modelling micro geometrical profiles in fused deposition process*, International Journal Advanced Manufacturing Technology (2012) 61:945–956
- [26] Merlet, J.P, *Parallel Robots-second edition*, editore Springer, stampa 2006
- [27] Liu Xinjun, Wang Jinsong, Li Tiemin, Duan Guanghong, *Parallel Mechanisms with Two or Three Degrees of Freedom*, tsinghua science and technology, ISSN 1007-0214 17/19 ppl05 112 Volume 8, Number 1, February 2003

- [28] Mohammad Jashim Uddin, Sameh Refaat, Saeid Nahavandi, Hieu Trinh,(2003),*kinematic and dynamic modeling of a robotic head with linear motors*,School of Engineering and Technology, Deakin University, Geelong 3217, Australia
- [29] Clément M. Gosselin,Jean-François Hamel,*The agile eye: a high-performance three-degree-of-freedom camera-orienting device*,International Conference on robotics and automation,Issue pt 1, 1994, Pages 781-786
- [30] G. Palmieri,M. Callegari, L. Carbonari, M.C. Palpacelli,(2014),*Design and testing of a spherical parallel mini manipulator*,IEEE
- [31] Ridha Kelaiaia, Olivier Company, Abdelouahab Zaatri,*Multiobjective optimization of a linear Delta parallel robot*,Mechanism and Machine Theory 50 (2012) 159–178
- [32] Jibin Lia, Zhangong Xieb, Xiaohui Zhanc, Qigao Zengd and Haijun Liue,*Study of Metal Powder Extrusion and Accumulating Rapid Prototyping*,Key Engineering Materials Vol. 443 (2010) pp 81-86
- [33] Giberti, H., Cinquemani, S., Legnani, G., 2011, *A practical approach to the selection of the motor-reducer unit in electric drive systems*, Mechanics Based Design of Structures and Machines, 39(3), pp. 303-319
- [34] Giberti H., Cinquemani S., Legnani G., 2010, *Effects of Transmission Mechanical Characteristics on the Choice of a Motor-Reducer*, Mechatronics - Elsevier Journal, 20, pp. 604 - 610
- [35] Giberti H., Clerici A., Cinquemani S., Available online 16 December 2013, *Specific Accelerating Factor: One More Tool in Motor Sizing Projects*, Mechatronics - Elsevier Journal, ISSN 0957-4158, <http://dx.doi.org/10.1016/j.mechatronics.2013.11.007>.