POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale

in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

Sviluppo di un sistema di proiezione laser applicato alla fabbricazione additiva

Relatore

prof. Eleonora Atzeni

Candidato

Giovanni Squame

Matr. S232806

A.A.2018

Ringraziamenti

Ringrazio la professoressa Eleonora Atzeni per avermi dato l'incredibile opportunità di proseguire il mio processo di crescita professionale e personale, consentendomi di sviluppare la presente tesi presso la Fundació CIM di Barcellona.

Dedico questo traguardo alla mia famiglia, per il sostengo incondizionato, per aver appoggiato ogni mia scelta senza farmi mai sentire lontano da casa. Lo dedico ai miei nonni, perché ci sono cose che non si imparano studiando. Lo dedico a tutte le persone che mi sono state affianco in questi anni: a chi da sempre, gli amici di una vita, e a chi è arrivato alla fine, nel momento più importante, ognuno a modo suo è stato essenziale nel conseguimento del mio obiettivo. Infine lo dedico agli anni di università vissuti a Napoli che mi hanno fatto sembrare meno difficile tutto ciò che è venuto dopo e che verrà poi.

Contenuti

1. Introduzione 4

2. Produzione additiva 6

2.1 Tecnologie di produzione 12

2.1.1 Vat Polymerization 13

2.1.2 Material Extrusion 14

2.1.3 Material Jetting 16

2.1.4 Binder Jetting 17

2.1.5 Powder Bed Fusion 18

2.1.6 Direct Energy Deposition 22

2.1.7 Sheet Lamination 22

3. Proiettore Laser 23

3.1 Progettazione 23

3.2 Realizzazione 31

3.3 Montaggio 37

3.4 Programmazione in C 41

3.4.1 Test di funzionamento 41

3.5 BCNC 42

3.5.1 Prove e analisi dei risultati 44

4. Struttura secondaria 46

4.1 Modifiche di progetto 46

4.2 Montaggio 48

4.3 Prove 52

4.4 Problematiche e possibili ulteriori miglioramenti 53

5. Conclusioni 54

6. Appendice 55

7. Bibliografia 63

1. Introduzione

L'obiettivo del presente lavoro di tesi è quello di progettare e realizzare un proiettore laser che possa essere implementato all'interno di un processo di produzione additiva, la selective laser sintering (sinterizzazione laser selettiva) in particolare, ma le cui possibilità applicative si estendono anche a tutte quelle tecnologie additive che utilizzano un laser focalizzato su di un piano di lavoro per consolidare materiale. In questi casi, infatti, il compito del laser è quello di tracciare su di una piattaforma, sulla quale sia stato precedentemente deposto un opportuno materiale, una certa traiettoria, rappresentante la geometria del componente da stampare, andando così a costruire gli strati di materiale uno per volta.

Si è scelto di utilizzare come sistema di controllo del laser un apparato composto da due specchi rotanti accoppiati a due motori passo passo. Il laser andrà ad incidere sul primo specchio, dopodiché verrà proiettato sul secondo, il quale, lo invierà alla superficie su cui andrà ad agire. Lo scopo è di comandare i motori grazie all'utilizzo di un software che riceve come input un'immagine o un disegno rappresentante un determinato profilo e trasmette in output ai due motori, in un linguaggio da essi interpretabile, i movimenti che dovranno eseguire affinché la stessa forma venga proiettata.

Attualmente in realtà esistono diversi sistemi cosiddetti di scanning utilizzati nella produzione additiva, ed un'alternativa al progetto scelto sarebbe stata quella di muovere direttamente il laser mediante due assi cartesiani comandati da altrettanti motori. Tuttavia, questo meccanismo risulta di gran lunga più lento rispetto a quello a specchi rotanti, ed il suo utilizzo comporterebbe tempi di realizzazione del pezzo molto più lunghi, perdendo così parte del principale vantaggio della fabbricazione additiva: la velocità. Inoltre, la testa del laser presenta un peso molto più rilevante rispetto a quello dei singoli specchi e pertanto sarebbero richiesti motori stepper che garantissero una coppia maggiore, ovviamente più costosi, dovendo tenere anche in considerazione la presenza significativa degli attriti meccanici nel movimento dei due assi.

La fabbricazione additiva, oltre ad essere una delle possibili applicazioni del progetto descritto, è anche il mezzo che verrà adoperato per la realizzazione degli elementi fisici che lo compongono. Infatti, una volta terminata la fase di progettazione del modello CAD, i vari pezzi verranno ottenuti attraverso la Fused Deposition Modeling (FDM), in seguito all'estrusione di un filamento di acido polilattico.

Ottenuto il primo prototipo saranno effettuati una serie di test, ossia di proiezioni a parete, al fine di evidenziare eventuali limiti relativi alla prima struttura fabbricata. Di conseguenza si cercherà, per quanto possibile, di contenere tali problematiche modificando il progetto iniziale in una nuova struttura che sia più performante rispetto alla precedente. Infine verranno effettuate nuove prove per poter ottenere un confronto tra i due casi, verificando l'evoluzione del modello ed inoltre stabilendo ulteriori possibili sviluppi per poter ottenere un risultato che si avvicini il più possibile a quello desiderato.

2. Produzione Additiva

La fabbricazione additiva o additive manufacturing, conosciuta anche come stampa 3D, si fonda sull'idea di realizzare oggetti attraverso una sovrapposizione di strati di materiale; il concetto alla base di questa tecnica si differenzia in maniera radicale rispetto alle tecniche di lavorazione tradizionali, nelle quali invece la realizzazione del prodotto finito si ottiene per asportazione di materiale (fresatura, tornitura ecc.), ossia si parte da un blocco di materiale di dimensioni maggiori e da lì si ricava la forma desiderata.

La fabbricazione additiva prevede un confronto diretto tra il computer, mediante il quale si realizza il disegno CAD, e la stampante 3D, che appunto esegue le istruzioni e realizza il pezzo. Questa sinergia introduce un ampio margine di personalizzazione dei prodotti e la possibilità di realizzare geometrie decisamente più articolate che dunque vanno completamente a stravolgere le caratteristiche, come il peso e quindi le prestazioni, dei pezzi che possono essere realizzati.
Innanzitutto cominciamo ad analizzare le varie fasi da seguire per poter poi giungere al risultato finale, ossia il pezzo finito.

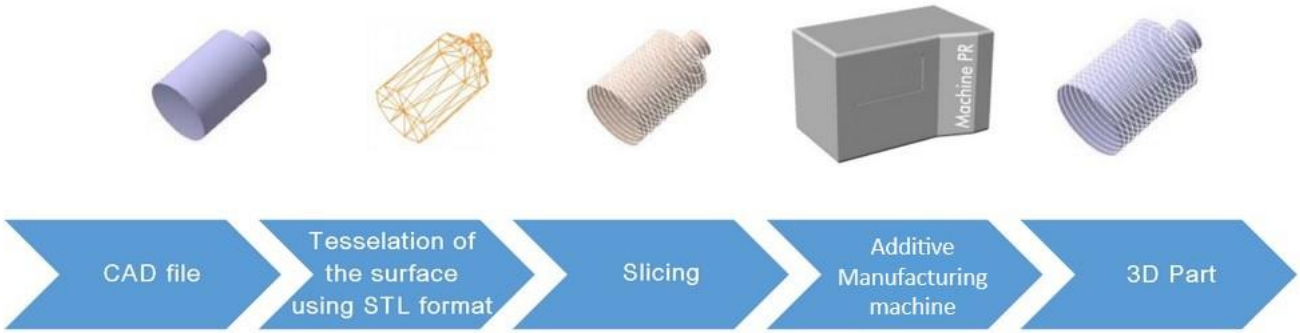

Figura 2.1 – Fasi di produzione nella fabbricazione additiva.

La prima fase prevede la progettazione del componente e quindi la realizzazione del file CAD 3D, che può essere prodotto con un qualsiasi software che si occupi di modellazione 3D come SolidWorks, AutoCAD e OpenSCAD ad esempio.

Una volta ultimato il disegno tridimensionale la fase successiva prevede la creazione di un file STL o AMF. Il formato STL si serve di triangoli per approssimare la superficie che dovrà essere costruita. Ciascun triangolo è caratterizzato da tre vertici e da una normale alla superficie. Il formato STL è stato introdotto per la prima volta dalla casa produttrice americana 3D Systems e poi successivamente reso di dominio pubblico, a disposizione di qualsiasi programma di modellazione CAD. Tale formato

essendo in ogni caso un'approssimazione del modello CAD, è possibile riscontrare delle incongruenze, come ad esempio spazi vuoti nella triangolazione oppure triangoli che si intersecano tra di essi; ad ogni modo, esistono software che eliminano queste imprecisioni in una fase più avanzata.

Il file STL viene quindi caricato su di un secondo programma che, dopo aver definito posizionamento e orientamento del pezzo nell'area di lavoro e generazione o meno di di supporti, ha il compito di effettuare il cosiddetto "slicing", ovvero la definizione di un determinato spessore dello slice (fetta). La realizzazione delle singole sezioni con spessore costante provoca la cosiddetta "scalettatura" ossia ciò che si ottiene è una struttura a scalini. L'accuratezza del pezzo finito dipenderà soprattutto da come esso verrà posizionato all'interno della macchina (in orizzontale, in verticale, in obliquo) e dallo spessore del layer che si stabilisce. Esiste anche una tecnica di slicing più performante rispetto a quella tradizionale che in pratica adatta lo spessore della singola fetta alla geometria del pezzo da realizzare, ovvero all'aumentare della curvatura aumenta anche il numero di slices per ottenere così una precisione maggiore. In questa fase si definiscono anche un'altra serie di parametri fondamentali, in primis la presenza o meno dei supporti; questo chiaramente dipende sia dal tipo di tecnica di fabbricazione additiva che viene utilizzata sia dalla geometria del pezzo che si vuole stampare. Laddove non sia strettamente necessario è bene evitare di utilizzare supporti, in modo soprattutto da consentire l'impiego di meno materie prime.

Quindi, definiti tutti i parametri, si può già avviare la fabbricazione dell'oggetto salvando il file in un determinato formato che la macchina possa leggere, cioè il G-Code, per i sistemi "open".

Infine conclusa la lavorazione da parte del sistema di fabbricazione additiva sono solitamente effettuati una serie di post trattamenti. La tipologia di trattamento eseguito varia molto in funzione della tecnologia di fabbricazione e del materiale utilizzato. Alcuni hanno come obiettivo di migliorare le proprietà meccaniche del pezzo, altri invece di migliorare la finitura superficiale. Tra le operazioni più diffuse abbiamo:

- Rimozione dei supporti. La rimozione dei supporti avviene quasi sempre come primo trattamento di qualsiasi tecnologia di produzione additiva. I supporti si dividono in supporti standard e solubili. La rimozione dei supporti è un procedimento obbligatorio, e rispetto a tutte le altre tecniche di postprocessing è l'unica che non produce un miglioramento della finitura superficiale del pezzo. Questa è una fase molto delicata perché essendo eseguita manualmente c'è il rischio di danneggiare il prodotto. È bene tener presente che non tutte le tecnologie, come vedremo nel dettaglio, richiedono la presenza di supporti;

- Trattamenti termici;
- Sabbiatura. Serve a rendere più liscia la superficie esterna del pezzo e anche a prepararla a nuovi trattamenti, ad esempio la colorazione;
- Incollaggio di parti;
- Lucidatura;
- Verniciatura;
- Metallizzazione sotto vuoto;

I vantaggi della prototipazione rapida sono numerosi e si possono sintetizzare come segue:

- Velocità di esecuzione:

  Uno dei principali vantaggi della produzione additiva è la velocità con cui i pezzi possono essere prodotti rispetto alle normali tecnologie. Una volta realizzato il modello CAD, esso viene semplicemente caricato sulla macchina e stampato. Inoltre il tempo necessario ad ottenere un qualsiasi elemento non dipende più dalla sua complessità ma esclusivamente delle sue dimensioni. La rapidità con cui oggi giorno è possibile ottenere un prototipo consente una verifica quasi immediata dello sviluppo delle idee di disegno da parte del progettista.

- Unico step di fabbricazione:

  Uno dei principali problemi per un progettista è stabilire come realizzare il pezzo nel modo più efficiente possibile, cioè in che ordine eseguire le varie procedure. Solitamente, infatti, molti pezzi richiedono un numero di step di realizzazione molto elevato se prodotti con le tecnologie tradizionali. L'ordine con cui sono realizzati questi step chiaramene influisce sulla qualità del progetto. Nella fabbricazione additiva, invece, questo aspetto non si prende mai in considerazione in quanto la fabbricazione dei componenti avviene sempre attraverso un unico step.

- Costi:

  Il costo totale di produzione può essere suddiviso in tre macro-categorie: costo di esercizio dei macchinari, costo delle materie prime e costo della manodopera. Analizziamoli nel dettaglio:

- Costo di esercizio dei macchinari:

  La maggior parte delle macchine 3D di uso non commerciale utilizza la stessa quantità di energia di un normale computer. Mentre macchinari di produzione additiva per produzione industriale consumano un quantità di energia elettrica molto elevata per produrre un solo pezzo. In ogni caso la possibilità di realizzare in un singolo step geometrie parecchio complesse comporta un'efficienza maggiore e pertanto anche un ritorno economico.

- Costo delle materie prime:

  I costi delle materie prime nella prototipazione rapida variano molto in base alla tecnologia utilizzata. Stampanti FDM per uso non commerciale utilizzano una bobina di filamento che costa sui 25 €/kg, mentre per le stampanti SLA è richiesta una resina che costa all'incirca 15 €/l. L'ampio range di materiali disponibili per la fabbricazione additiva rende difficile un confronto con le tecnologie tradizionali. Il Nylon utilizzato nell'SLS costa orientativamente 30 €/kg, mentre lo stesso materiale usato nello stampaggio a iniezione può essere acquistato per una cifra che varia tra i 2 e i 5 €/kg. I costi dei materiali sono il contributo maggiore nei costi totali di produzione con la tecnologia additiva.

- Costo della manodopera:

  Altro vantaggio fondamentale della fabbricazione additiva è il basso costo della manodopera. Le stampanti 3D infatti non hanno bisogno di ricevere particolari istruzioni affinché lavorino in maniera corretta, anzi nella maggior parte dei casi risulta sufficiente premere un tasto per far partire in maniera automatica il processo di produzione del pezzo. Dunque rispetto alle tradizionali tecniche di fabbricazione, dove sono richiesti operatori altamente specializzati, il costo del lavoro nella produzione additiva è dunque molto più basso, quasi pari a zero.

Nel caso di volumi di produzione bassi la produzione additiva è molto competitiva in termini di costi rispetto alle tecniche tradizionali. Infatti per la produzione di prototipi, per verificarne forma e misure è molto più economica di qualsiasi altro metodo di produzione. Le tecniche di produzione classiche invece diventano sempre più efficienti quando aumentano i volumi di

produzione, infatti gli elevati costi di set-up dei macchinari vengono giustificati soltanto se la produzione è elevata.

- Riduzione del rischio:

Con la fabbricazione additiva il numero di prototipi che un progettista può richiedere cresce notevolmente in quanto l'impatto economico è molto più contenuto. Avere la possibilità di stampare un prototipo di preserie di un prodotto, cioè con caratteristiche quasi del tutto simili a quello definitivo e praticamente già pronto ad essere avviato al processo di produzione prima di effettuare un importante investimento in attrezzature o macchinari riduce chiaramente il rischio di un errato investimento economico.

- Libertà nella complessità di progettazione:

Le restrizioni imposte dalle tecnologie tradizionali su cosa può essere fatto o meno non sono più rilevanti per la produzione additiva. Visto che i componenti sono costruiti uno strato per volta, requisiti di progetto come ad esempio sottosquadri o accesso degli utensili non influiscono nella fabbricazione additiva.
La maggior parte delle limitazioni nella fabbricazione additiva riguardano per esempio il posizionamento del pezzo sulla piattaforma di lavoro per ridurre il bisogno di supporti e la probabilità che si verifichi un errore in fase di stampa. Questo dunque conferisce la possibilità di progettare liberamente e quindi di generare una grande quantità di creazioni con geometria complessa.

- Personalizzazione:

Non solo la fabbricazione additiva consente una maggiore libertà di progetto ma garantisce una completa personalizzazione dei prodotti. Le attuali tecnologie di produzione additiva infatti eccellono nella realizzazione di pezzi uno per volta, sono quindi perfette nella produzione all'unità.
Questo concetto è stato accolto dall'azienda medica e dentale nella costruzione di protesi personalizzate, impianti o placche. Tale caratteristica chiaramente si è molto diffusa anche nel campo della moda nella personalizzazione di gioielli, occhiali da sole ma anche nel campo dello sport, in cui si commissionano persino attrezzature sportive per gli allenamenti di atleti professionisti.

- Facile accessibilità:

La fabbricazione additiva è nata all'incirca 30 anni fa anche se il maggior sviluppo si è potuto apprezzare a partire dal 2010. Ciò deriva dall'alto numero di stampanti 3D che sono entrate nell'industria, rendendo più semplice ai progettisti l'approccio alla nuova tecnologia.
Nel solo 2015 più di 278.000 stampanti 3D, cosiddette desktop, sono state vendute globalmente, ovvero circa il doppio dell'anno precedente. Ciò che rappresentava originalmente una tecnologia di nicchia sta diventando sempre di più accessibile a livello industriale, soprattutto per la sua capacità di adattarsi a un numero elevato di tipologie differenti di aziende, in qualsiasi campo.

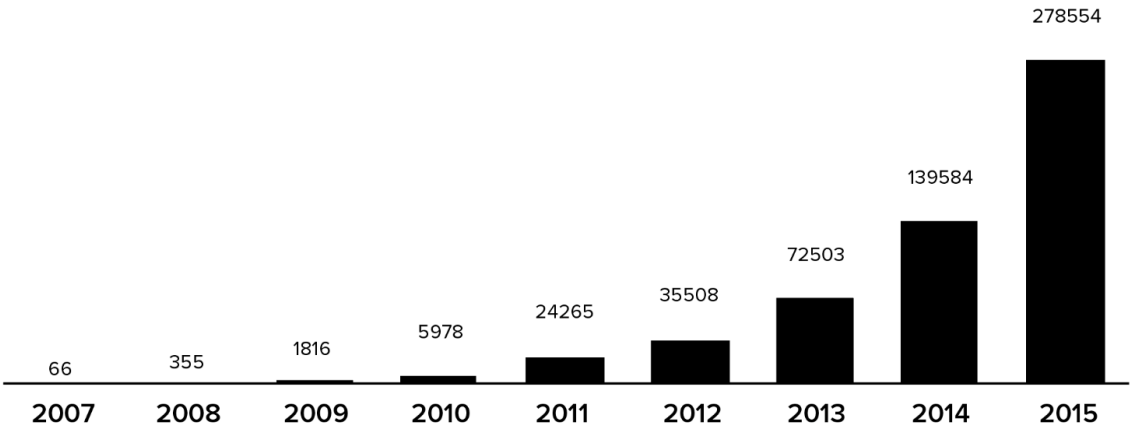

Figura 2.2 - Andamento vendite stampanti 3D di tipo desktop.

- Sostenibilità:

Le tecnologie per asportazione di materiale, rimuovono una consistente quantità di materiale da un blocco inziale, generando necessariamente un grande spreco di materie prime.
La fabbricazione additiva generalmente usa soltanto il materiale necessario alla costruzione del pezzo. Molti processi inoltre utilizzano materie prime che possono essere riciclate e quindi riutilizzate in più di una realizzazione. Come risultato dunque gli sprechi prodotti sono molto poco significativi.

Inoltre solitamente l'attrezzatura di una stampante 3D è di dimensioni molto più contenute rispetto ad una normale macchina a controllo numerico e ciò ne facilita la spedizione a lunghe distanze. In più molto spesso, come si è già accennato, il know-how necessario per il funzionamento di una macchina per produzione additiva è particolarmente ridotto, pertanto non è necessario che i progetti siano inviati ad un esperto tecnico per essere realizzati. La

riduzione in invii di attrezzature ha anche un impatto ambientale positivo; quest'aspetto, accoppiato con la possibilità di poter produrre pezzi di ricambio sul sito stesso, genera una minore produzione complessiva di sostanze inquinanti.

Specialmente negli ultimi tempi la diffusione di tale tecnica produttiva sta prendendo ampiamente il largo generando un impatto sia economico ma soprattutto sociale decisamente importante. Se la cosiddetta "terza rivoluzione industriale" dovesse prendere sempre più piede, come prevedono i numeri, inevitabilmente ci sarebbe un sorpasso della tecnologia 3D nei confronti delle tecniche di produzione tradizionali, e ciò richiederebbe nuovi operatori specializzati con capacità differenti da quelle attuali.

2.1 Tecnologie di produzione

I campi di utilizzo sono i più disparati partendo da quello aerospaziale, sino a giungere a quello biomedico in cui è ormai una consuetudine produrre protesi usufruendo di stampanti 3D. In *Figura 2.3* è presente un riassunto delle varie tecnologie appartenenti alla famiglia della produzione additiva e dei materiali che ciascuna di essa utilizza. La classificazione segue la normativa ASTM F42, rilasciata nel 2010, secondo la quale i processi di fabbricazione additiva possono essere suddivisi in 7 categorie.

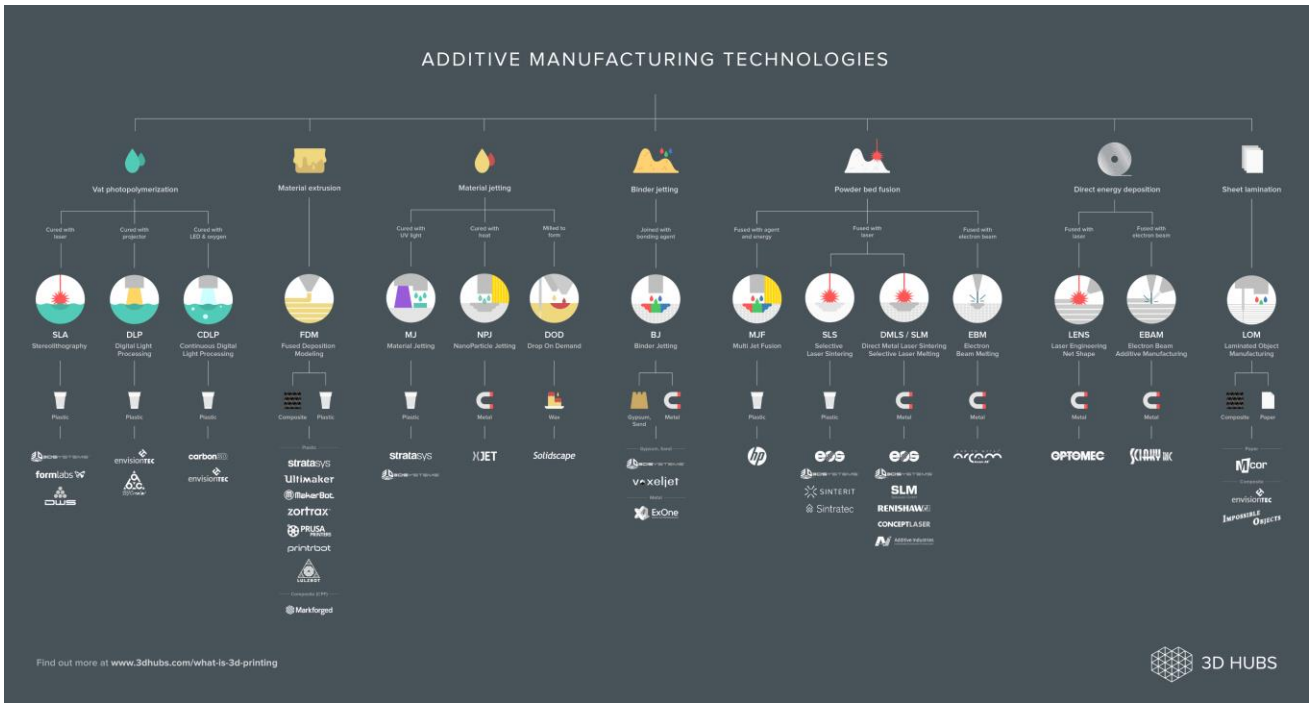

Figura 2.3 – Tecnologie di fabbricazione additiva

2.1.1 Vat polymerization

La polimerizzazione si verifica quando una resina fotosensibile è esposta alla luce ad una specifica lunghezza d'onda e tramite una reazione chimica essa si solidifica.

I componenti realizzati con questa tecnica presentano un ottimo grado di dettaglio ed una finitura superficiale anch'essa di buon livello, per questo motivo vengono utilizzati ad esempio nel campo della gioielleria, per effettuare test di tipo aerodinamico o ancora per studiare il corretto assemblaggio tra più parti.

Tra le tecniche di produzione additiva che utilizzano questo fenomeno sicuramente le più comuni sono:

- **SLA:**

  La macchina è composta da una vasca che contiene al suo interno resina liquida. Si utilizza un fotopolimero che a contatto con una luce UV solidifica. C'è una piattaforma collegata con un dispositivo che la fa alzare ed abbassare. Inizialmente la piattaforma si trova alla sua altezza massima che dipende dallo spessore del layer, che solitamente è 25/30 micron.

  La sorgente UV è focalizzata sulla parte di liquido che si vuole solidificare. Inizialmente il laser percorre il perimetro esterno e quello interno del pezzo da realizzare. Dopodiché si

effettua il cosiddetto etching ossia il riempimento, secondo linee parallele all'asse x o all'asse y. Quando il primo strato è completato la piattaforma si abbassa e continua il processo nello stesso modo.

Nell'SLA le dimensioni dei pezzi che possono essere fabbricati sono molto variabili, si possono trovare infatti vasche di dimensioni piccole o anche molto grandi. È bene ricordare però che l'intero contenitore deve necessariamente essere riempito di resina liquida. In seguito alla lavorazione la resina in eccesso non può essere riutilizzata, ciò comporta uno spreco che rende questa tecnica molto costosa.

- **DLP:**

  La DLP è molto simile alla tecnica SLA, anche se la DLP utilizza un proiettore digitale che protetta l'immagine di ogni singolo strato per volta. La DLP garantisce una velocità di costruzione molto maggiore rispetto all'SLA in quanto grazie al proiettore l'intero strato di resina, colpito dalla luce, indurisce contemporaneamente in tutti i punti dello stesso. Al contrario nelle stampanti SLA che invece utilizzano un laser, il tempo di fabbricazione è maggiore perché il laser dovrà disegnare sulla resina il layer, e questo comporta maggior tempo. Solitamente le stampanti SLS sono più economiche e garantiscono anche una qualità e un dettaglio maggiore rispetto alle stampanti dotate di proiettore.

2.1.2 Material Extrusion

L'estrusione è una tecnica molto rapida ed efficiente dal punto di vista economico e viene comunemente utilizzata per realizzare prototipi plastici.

L'FDM (fused deposition modelling) è sicuramente la tecnologia di produzione additiva maggiormente diffusa. I pezzi sono realizzati in materiale termoplastico, avvolto in una bobina. Il filamento grazie ad un motore scorre fino a giungere ad un estrusore, che per la sua elevata temperatura lo fonde. L'estrusore è mosso da due motori sul piano x-y depositando così materiale fuso che poi andrà a solidificarsi. La superficie sulla quale si deposita il materiale, che solitamente viene riscaldata, può invece muoversi verticalmente.

L'FDM è la tecnica di fabbricazione che è stata utilizzata nella realizzazione dei componenti nel presente progetto di tesi. Grazie a questa tecnica si sono potuti realizzare numerosi prototipi di forma,

che sono serviti principalmente per analizzare l'accoppiamento tra i vari pezzi in fase di montaggio. Inoltre non essendo noto a priori il comportamento del materiale durante la fase di stampa, con l'FDM è stato molto semplice e rapido realizzare uno studio iniziale sulle varie tolleranze da tenere in considerazione in fase di progetto.

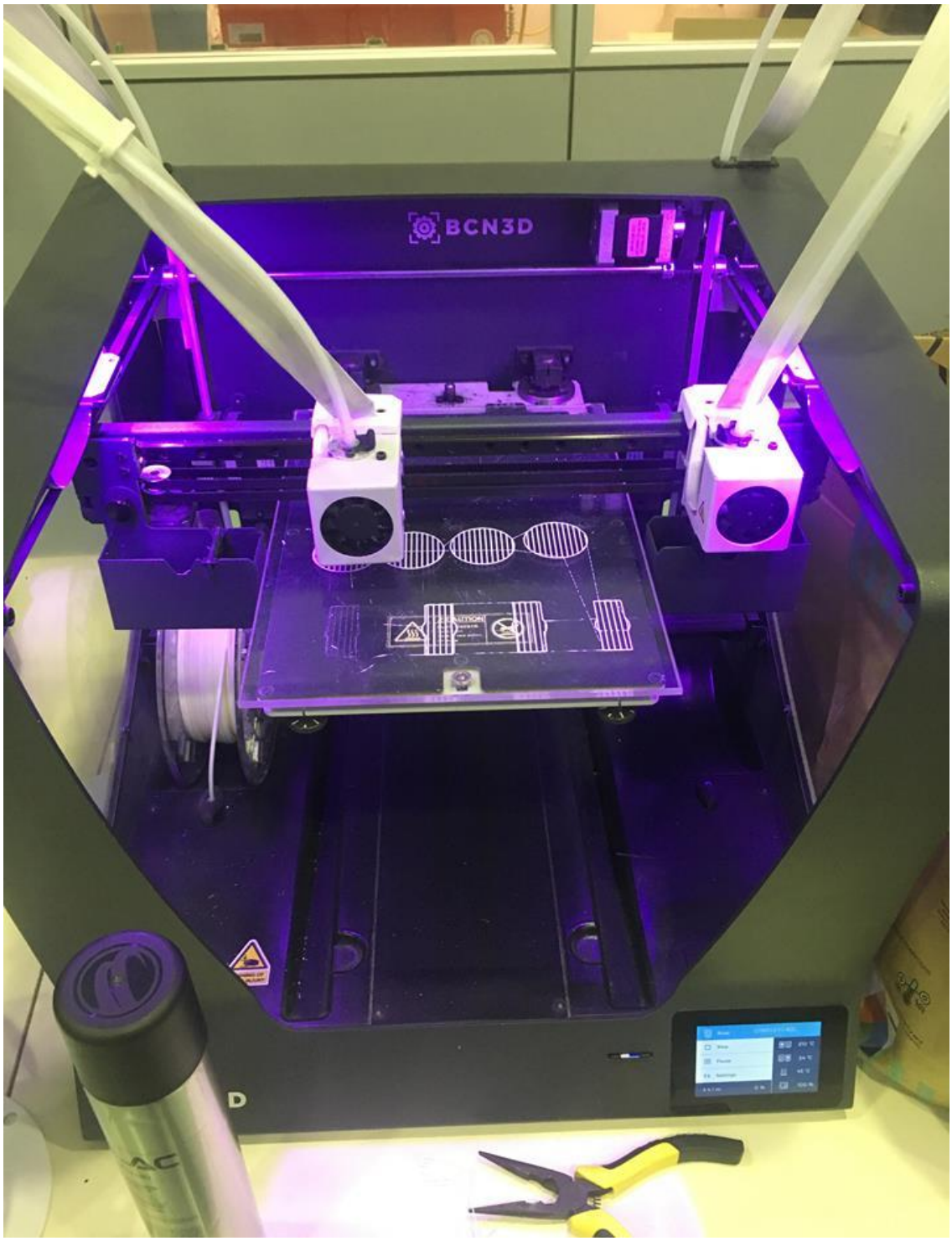

Figura 2.4 – Stampante FDM, della casa BCN3D.

Come si vede in *Figura 2.4* la stampante utilizzata è dotata di due estrusori, ciò consente di lavorare contemporaneamente con due materiali differenti, utile per costruire i supporti di un materiale più facilmente rimuovibile. La piattaforma invece è in vetro e prima di ogni lavorazione vi è applicata una lacca per favorire l'adesione tra il primo strato di materiale e la piattaforma stessa

2.1.3 Material Jetting

La fabbricazione additiva PolyJet solitamente è confrontata con la classica stampa 2D con getto d'inchiostro. Però invece di gocce d'inchiostro vengono depositati dei fotopolimeri liquidi, che sottoposti ad una luce UV si solidificano, creando così i vari strati di materiale.

Le applicazioni solitamente sono in campo medico. Il material jetting è ideale per la realizzazione di prototipi reali grazie all'elevato grado di dettaglio dei pezzi e all'elevata finitura superficiale. Si possono progettare e realizzare pezzi costituiti sia da materiarli che da colori differenti in una singola stampa. Con questa tecnica infatti è possibile costruire i supporti di materiale differente, ad esempio di un materiale solubile in modo da poterli facilmente rimuovere nella fase di postprocessing. L'unico limite è dettato dal elevato costo e dalle scarse proprietà meccaniche dei fotopolimeri.

Tra le tecnologie di Material Jetting ricordiamo:

- **Material Jetting:**

  Solitamente i fotopolimeri sono rilasciati utilizzando centinaia di piccoli ugelli. Con questa tecnica si può ottenere una velocità di lavorazione molto più rapida rispetto alle tecniche che ne utilizzano uno solo, il quale ha il compito di tracciare, sul piano di lavoro, la forma di ogni singolo strato. Non appena la goccia di resina è depositata sulla piattaforma di lavoro, grazie all'effetto della luce UV essa si solidifica e il processo procede in questo modo uno strato alla volta.

- **Nano particle jetting:**

  Come si evince dal nome, in questa tecnica si utilizzano liquidi che contengono nano particelle di metallo in dispersione. Sono depositati degli strati estremamente sottili di materiale ed a

causa delle elevate temperature dell'ambiente di lavoro il liquido evapora lasciando solamente le particelle di metallo.

- **Drop-On-Demand (DOD):**

  Con questa tecnica disponiamo di due ugelli che lavorano contemporaneamente. Uno serve per realizzare il pezzo vero e proprio, mentre l'altro per costruire supporti di un materiale solubile e facilmente rimovibile. Come le tecniche tradizionali di produzione additiva, nella DOD dunque gli ugelli tracciano un disegno predeterminato depositando il materiale nei punti in cui si vuole costruire. Solitamente questa macchine sono dotate anche di una sorta di taglierino che alla fine di ogni strato percorre il perimetro del pezzo per ottenere una superficie del pezzo stesso più piatta possibile.

2.1.4 Binder Jetting

I pezzi realizzati con la tecnologia binder jetting vengono utilizzati principalmente per far risaltare la forma estetica, come in modelli architettonici. Sono usati per ottenere dei prototipi funzionali in quanto le proprietà meccaniche sono abbastanza scarse.

Nel binder jetting si lavora con un letto di polveri ed un rullo che ha il compito di depositare le polveri. Le polveri vengono adagiate su di una piattaforma che si muove verticalmente in funzione dello spessore del layer. In poche parole sono presenti alcuni ugelli che scorrendo sulla piattaforma di lavoro rilasciano un legante che appunto incolla le varie particelle di polvere tra di loro e con lo strato successivo. Non è necessaria la presenza di supporti. Le polveri possono essere sia di materiale ceramico che metallico. Solitamente una volta ottenuto il pezzo si effettuano delle infiltrazioni con resina che migliora le proprietà meccaniche del pezzo. Tra le varie tecnologie è la più economica ed è perfettamente scalabile, ossia si possono ottenere pezzi di qualsiasi dimensione.

2.1.5 Powder Bed Fusion

La fusione di polveri produce un pezzo solido utilizzando una fonte di calore che induce appunto la fusione tra le particelle di polvere di materiale plastico o metallico, uno strato alla volta.

Una volta che il pezzo sarà completato esso si troverà incapsulato all'interno della polvere che poi in una fase successiva verrà rimossa.

Visto che il letto di polveri non richiede l'utilizzo di supporti è consentito realizzare anche geometrie di una certa complessità.

Sia i materiali metallici che plastici prodotti con la tecnologia PBF sono dotati di elevata resistenza e rigidezza e hanno proprietà meccaniche simili o addirittura superiori ai materiali tradizionali. Ci sono diversi metodi di postrocessing disponibili e con essi i pezzi prodotti in PBF possono raggiungere un'ottima finitura superficiale.

Le varie tecnologie di produzione riconducibili alla categoria BPF si differenziano fra loro in particolare in base alla fonte di calore che viene utilizzata:

- **SLS:**

  Tra le varie tecniche di fabbricazione additiva c'è sicuramente l'SLS, ossia selective laser sintering. Tale tecnica prevede l'utilizzo di polveri di materiali polimerici. Le potenze del fascio solitamente sono di 50W.

  È bene ricordare che tutto il procedimento avviene in una camera chiusa in cui è presente un gas inerte, come argon o azoto, che ha come scopo quello di contenere l'eventuale ossidazione o la possibile contaminazione del materiale soprattutto quando esso viene fuso. La camera è anche tenuta calda per cercare di ridurre i tensionamenti durante la formazione del pezzo, e ciò si ottiene da un lato utilizzando un sistema ad infrarossi e dall'altro mantenendo la piattaforma su cui si costruisce il pezzo anch'essa riscaldata.

  Lo schema di riferimento della sinterizzazione laser è riportato in seguito.

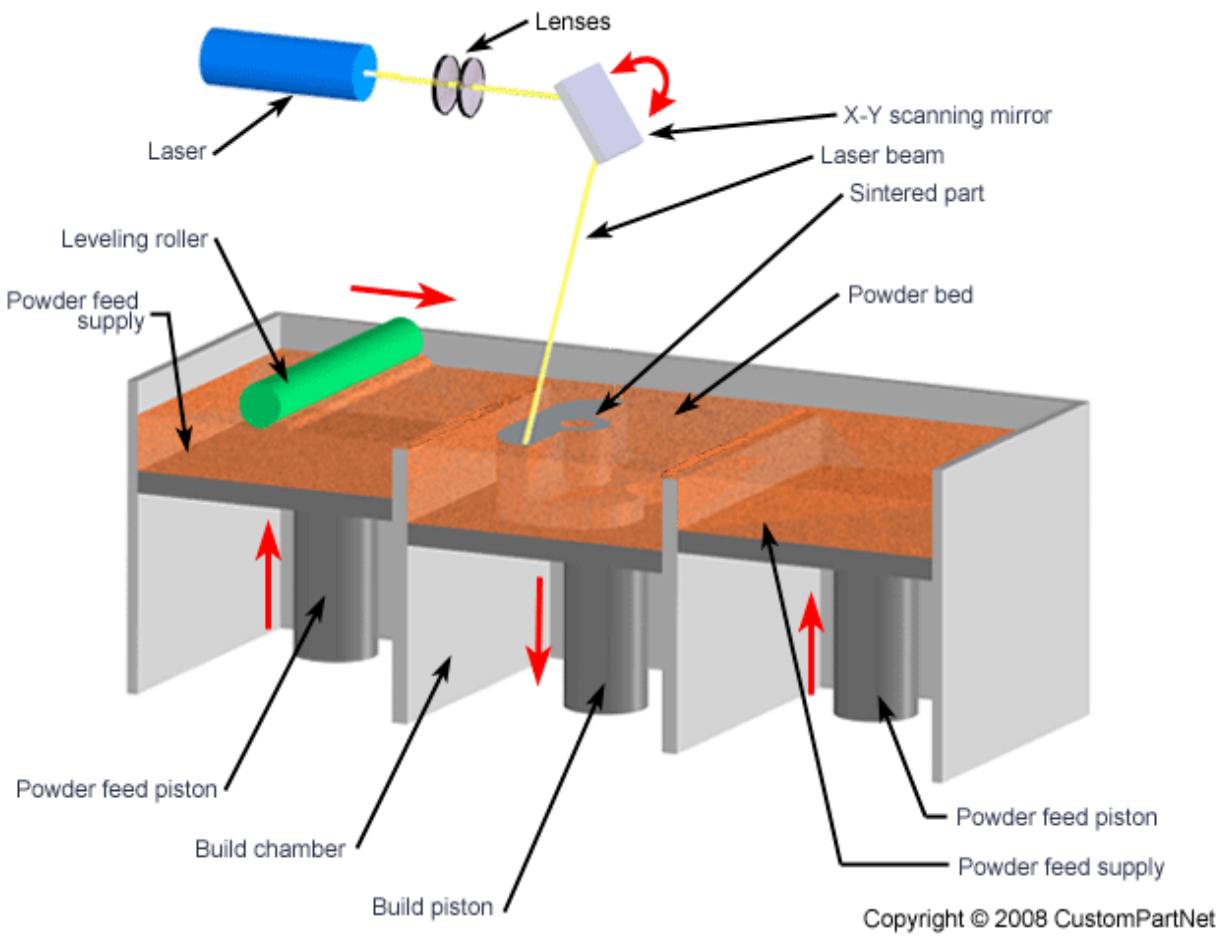

Figura 2.5 – Modello di una stampante SLS.

Come suggerisce il nome, la sinterizzazione laser sfrutta una sorgente laser, che genera un fascio laser il quale è utilizzato per sinterizzare le polveri. Le polveri sono posizionate su di una piastra di lavoro che può scorrere lungo l'asse verticale.

Il laser dunque giunge ad un sistema di scanning grazie al quale viene proiettato su di un piano x-y con una velocità dell'ordine del metro per secondo.

Il fascio laser porta alla fusione delle polveri solitamente nei punti in cui è necessario appunto costruire del materiale, secondo le istruzioni che vengono fornite dal disegno CAD. Il resto delle polveri invece resta sempre nelle stesse condizioni in modo che, alla fine della realizzazione del pezzo, esse potranno essere rimosse e riutilizzate in una lavorazione successiva. Lo spessore dello strato di polveri dipende da come sono stati fissati i parametri nella fasi di slicing del modello CAD realizzato.

Una volta terminata la prima fase di scansione, e dunque una volta creata la prima slice, viene fatta abbassare la piattaforma di sostegno delle polveri di un'altezza pari alla dimensione dello strato delle polveri. E come visibile in *Figura 2.5*, si utilizza un rullo che scorrendo tende a

ricoprire interamente la vasca di polveri. Il processo andrà così avanti finché il pezzo non sarà completato.
Una volta terminato il pezzo verranno innanzitutto rimosse le polveri che non hanno preso parte alla sinterizzazione e solitamente vengono effettuati prima dei trattamenti di tipo termico sul pezzo, per ridurre eventuali stati di tensione, successivamente possono essere realizzare una serie di procedure che servono a migliorare la finitura superficiale del pezzo stesso.
Il limite di tale tecnica è sicuramente il fatto che non sia possibile realizzare dei pezzi cavi chiusi in quanto non ci sarebbe la possibilità di rimuovere, al termine della lavorazione, le polveri non reagite. Uno dei vantaggi invece è che la presenza di supporti non è quasi mai necessaria in quanto il prodotto giace su di un letto di polveri, e di conseguenza è già dotato di sostegno, qualora fosse richiesto dalla geometria del pezzo. Con ciò chiaramente si genera un risparmio di materiali e di tempo e quindi ovviamente anche un risparmio in termini economici. Inoltre solitamente la rimozione dei supporti causa un peggioramento della qualità della finitura superficiale del pezzo e la loro assenza esclude quindi il rischio di un danneggiamento del pezzo in seguito alla rimozione degli stessi.

L'idea dunque è quella di sfruttare come testa di scansione il sistema di specchi, che nei capitoli successivi della presente tesi verrà dettagliato, e quindi per focalizzare il fascio laser, chiaramente con caratteristiche differenti da quello utilizzato nell'esperimento, sul letto in cui giacciono le polveri.
In questa applicazione pertanto bisognerebbe complicare abbastanza il progetto, in quanto sarebbe necessario aggiungere anche un nuovo meccanismo che consenta di accendere o spegnere il laser, a seconda che sia necessario costruire materiale o meno. Saranno inoltre richiesti materiali con proprietà sicuramente maggiori e quindi un costo molto più elevato, ma si può benissimo sfruttare la capacità di trasmettere il movimento ai motori, e quindi agli specchi, implementando il file CAD all'interno del programma bcnc.

- **Sistemi laser SLM:**

La tecnica di fabbricazione della selective laser melting è molto simile a quella utilizzata dall'SLS, la differenza è che l'SLM è usata per la produzione di componenti metallici. Le polveri metalliche necessitano di una potenza superiore per essere attivate rispetto a quelle plastiche, per questo si utilizzano laser con una potenza sino a 1000W. Nell'SLM si produce una fusione completa delle polveri. Esse si fondono grazie alla potenza del laser e solidificano immediatamente perché sono sottoposte ad un elevato gradiente di temperatura. Con queste

tecniche si formano granulometrie finissime e quindi ciò comporta proprietà meccaniche molto elevate in tutti i punti del pezzo. A differenza dell'SLS, queste due tecniche richiedono la presenza di supporti per compensare l'elevato stato di tensioni che si genera durante la fase di costruzione del pezzo a causa appunto degli elevati gradienti temici. Solitamente sono usati supporti in metallo che sono difficili da rimuovere manualmente, ed è per questa ragione che si tende ad evitarli il più possibile e ciò comporta comunque delle limitazioni in fase di progetto.

- **Electron Beam Melting (EBM):**

  L'EBM utilizza un fascio di elettroni piuttosto che un laser per indurre alla fusione di particelle di polvere metallica. Un raggio di elettroni dunque scansiona un layer di polvere provocando la fusione delle polveri in tale punto. Il fascio di elettroni può essere defocalizzato e utilizzato per riscaldare le polveri e quindi ridurre gli stati di tensione residua nei pezzi, ciò implica che la presenza dei supporti si riduca rispetto ai casi precedentemente elencati. Inoltre l'EBM utilizza minore energia e si possono produrre strati con una velocità maggiore rispetto all' SLM. Le polveri metalliche che vengono usate con tale tecnologia produttiva hanno un diametro maggiore, e dunque comportano un costo più basso. Il fascio di elettroni consente di raggiungere una porosità praticamente nulla e di avere di conseguenza un pezzo denso al 100%. Nell'EBM è richiesto che la lavorazione venga effettuata nel vuoto perché c'è il rischio che le particelle presenti nell'aria possano andare a interagire con gli elettroni e deviarli. Il fascio elettronico è orientato con una variazione di campo magnetico, per questo è molto più rapido rispetto a tutte le altre tecniche appartenenti alla Power Bed Fusion

- **Multi Jet Fusion (MJF):**

  La MJF è essenzialmente la combinazione tra SLS e material jetting. Multi Jet Fusion è una tecnologia basata su polveri, che però non impiega i laser. Il letto di polvere viene riscaldato all'inizio in modo uniforme. Viene poi depositato un agente di fusione nei punti in cui è necessario fondere selettivamente le particelle; un agente di rifinitura viene depositato intorno ai contorni, per migliorare la risoluzione delle parti. Mentre le lampade passano al di sopra della superficie del letto di polvere, il materiale depositato cattura il calore e contribuisce a distribuirlo in modo uniforme.

2.1.6 Direct Energy Deposition

La Direct Energy Deposition realizza componenti grazie alla fusione di polveri non appena esse vengono depositate e alla loro successiva solidificazione. Prevalentemente è utilizzata con polveri di tipo metallico.

Si possono ottenere componenti metallici di vari materiali (alluminio, rame, acciaio inox, titanio ecc.) che vengono utilizzati per protesi nel campo medico, utensili per lo stampaggio ad iniezione o anche nell'aviazioni in quanto si possono realizzare vere e proprie parti di aeroplani.

Sono presenti due differenti tecnologie di produzione appartenenti alla categoria DED:

- **Laser Engineered Net Shape (LENS):**

  Questa tecnica utilizza una testa di deposizione composta da un laser, un ugello che rilascia polveri e delle tubature per il passaggio di gas inerti in modo da poter fondere la polvere una volta che essa viene depositata sul letto di lavoro, e ciò si ripete strato per strato. Il laser crea una poltiglia sull'area di costruzione e la polvere viene depositata su tale superficie, dove si fonde e poi solidifica.

- **Electron Beam Additive Manufacture (EBAM):**

  Il processo di costruzione è molto simile a quello della tecnica LENS. È utilizzata per creare componenti metallici utilizzando una polvere metallica o una bobina metallica, saldati tra loro utilizzando un fascio di elettroni.

2.1.7 Sheet Lamination

Attraverso la sheet lamination si producono essenzialmente oggetti colorati con un elevato grado di dettaglio. Sono utilizzati normalmente dei fogli di allumino a cui viene conferita una determinata forma mediante un laser oppure una lama tagliente. Questi vari strati vengono via via sovrapposti appianando un collante fino ad ottenere la geometria richiesta.

3. Proiettore Laser

3.1 Progettazione

La prima fase della progettazione è stata dedicata essenzialmente ad individuare quali dovessero essere le forme, dimensioni e le posizioni ottimali dei due specchi riflettenti. Innanzitutto si è optato per specchi di forma rettangolare per una questione di comodità in quanto, in seguito ad una ricerca sul mercato, sono risultati la tipologia più diffusa e dunque di più semplice reperibilità.

Si nota immediatamente che, posizionando i due specchi in maniera che i due assi siano perpendicolari tra loro e che i rettangoli si dimezzino scambievolmente, la superficie in cui può essere proiettato presenta una forma rettangolare in cui la dimensione orizzontale (**a**) è quella limitante in quanto, ruotando di 180°, lo specchio superiore può coprire l'intero asse verticale.

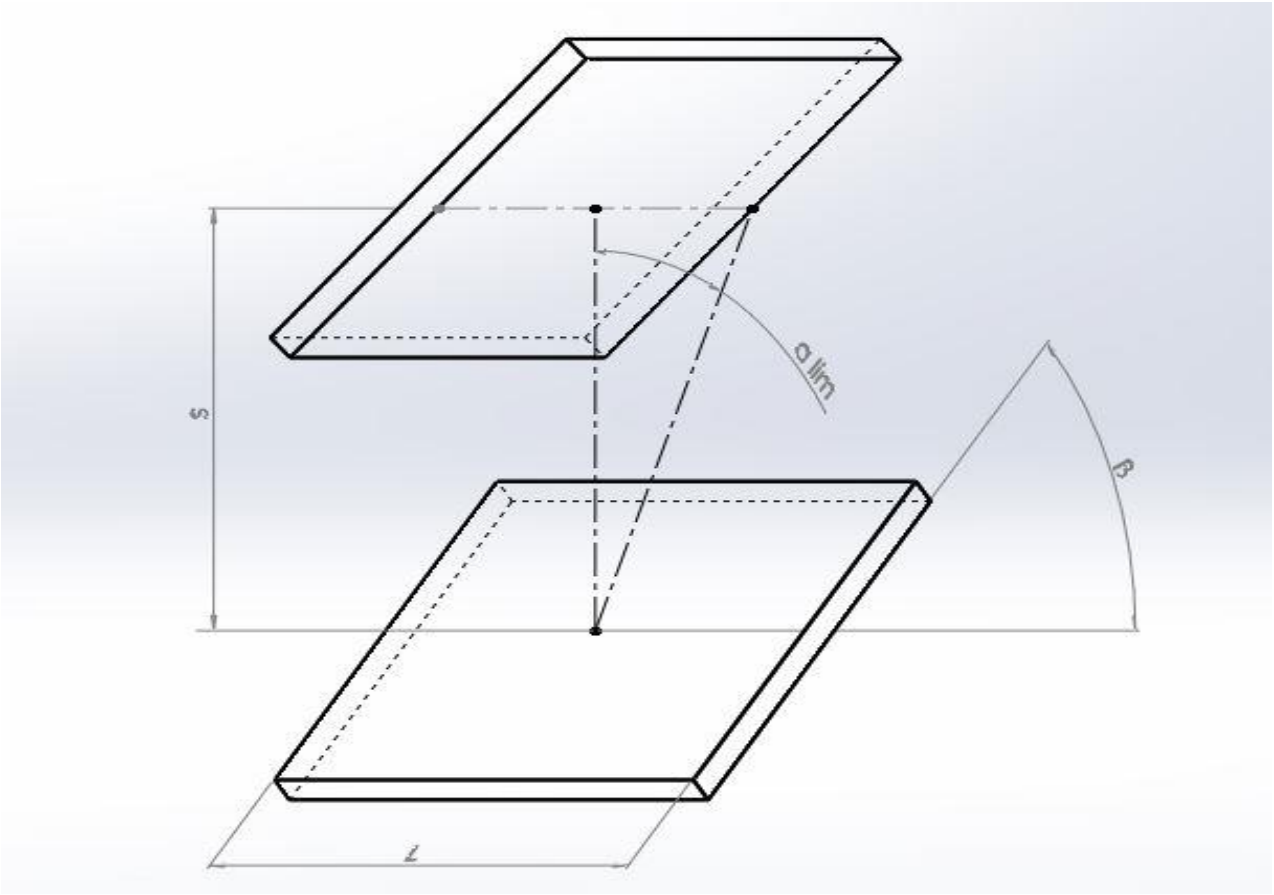

Figura 3.1 – Rappresentazione trigonometrica

Dalla *Figura 3.1*, raffigurante il posizionamento relativo dei due specchi, possono essere individuati una serie di parametri geometrici fondamentali esplicitati nella tabella sottostante:

a	Dimensione orizzontale dell'area di proiezione
l	Distanza tra il secondo specchio e la parete
s	Distanza ortogonale tra gli assi dei due specchi
α_{lim}	Angolo che si forma quando il laser incontra il secondo specchio nella sua estremità
β	Angolo di inclinazione del primo specchio
L	Dimensione caratteristica degli specchi

Tabella 3.1 – Parametri geometrici

L'obiettivo dunque è stabilire quali valori numerici assegnare a tali parametri, ed il criterio discriminante che viene adoperato è quello di trovare un giusto compromesso tra ingombri e risoluzione.

Si definisce risoluzione **u**, la distanza orizzontale, o verticale, tra due posizioni consecutive del laser sulla parete in seguito alla minima rotazione possibile di uno dei due specchi, mantenendo l'altro fisso. È facile intuire che la risoluzione è funzione sia della distanza tra il secondo specchio e la parete (**l**) che della distanza tra i due specchi (**s**), oltre ovviamene che al minimo $\Delta\beta$ possibile, sebbene tale parametro venga considerato già determinato in quanto si vogliono utilizzare nell'esperimento i motori che già si hanno a disposizione.

Dunque per avere una risoluzione massima possibile dovremmo avvicinare al massimo i due assi rotanti tra di loro, e quindi ridurre al massimo le dimensioni degli specchi in modo che gli ingombri non vadano a limitare la distanza minima **s** (ricordando che vale la relazione $\mathbf{s} \geq \mathbf{L}$), e allo stesso tempo avvicinare il più possibile gli specchi alla parete di proiezione. In questa maniera, però, se da un lato ne beneficia la risoluzione, da un altro la dimensione a tende a ridursi moltissimo e di conseguenza potremmo proiettare esclusivamente forme di dimensione ridotta. È per questo che si è pensato di diagrammare alcuni parametri in funzione di altri in modo da poter avere un quadro più completo della situazione e scegliere opportunamente i valori da assegnare nella prima parte del progetto.

In Tabella 3.2 vengono fissate le dimensioni di **a**, **L,** ed **s** riuscendo così a valutare la distanza a cui posizionare il secondo specchio rispetto alla parete e la risoluzione **u**. Dopodiché viene incrementato gradualmente **s** e si determina le variazioni di **u** e di **l** corrispondente, come riportato in *Figura 3.2* ed in *Figura 3.3*.

	m/°	m/°	m/°	m/°	m/°	m/°	m/°	m/°	m/°
a	1	1	1	1	1	1	1	1	1
L	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
s	0,032	0,037	0,042	0,047	0,052	0,057	0,062	0,067	0,072
Δx	0,485	0,485	0,485	0,485	0,485	0,485	0,485	0,485	0,485
l	1,0347	1,1963	1,3580	1,5197	1,6813	1,8430	2,0047	2,1663	2,3280
α_{lim}	64,89	67,93	70,35	72,30	73,91	75,26	76,40	77,38	78,23
β	45	45	45	45	45	45	45	45	45
β'	44,1	44,1	44,1	44,1	44,1	44,1	44,1	44,1	44,1
α'	88,2	88,2	88,2	88,2	88,2	88,2	88,2	88,2	88,2
v	0,0010	0,0012	0,0013	0,0015	0,0016	0,0018	0,0019	0,0021	0,0023
Δx'	0,0325	0,0376	0,0427	0,0478	0,0528	0,0579	0,0630	0,0681	0,0732
u	0,0335	0,0388	0,0440	0,0492	0,0545	0,0597	0,0649	0,0702	0,0754

Tabella 3.2 – Variazione della distanza tra i due specchi

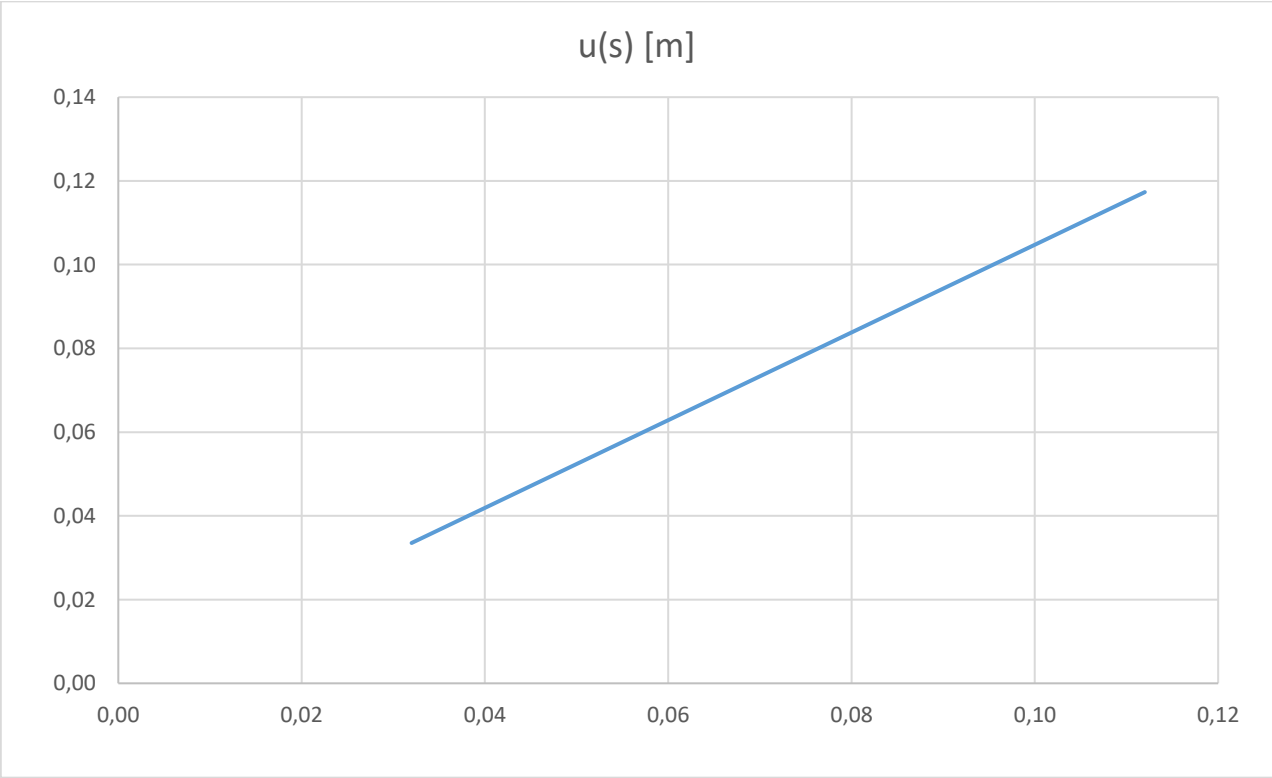

*Figura 3.2 – andamento di **u** in funzione di **s***

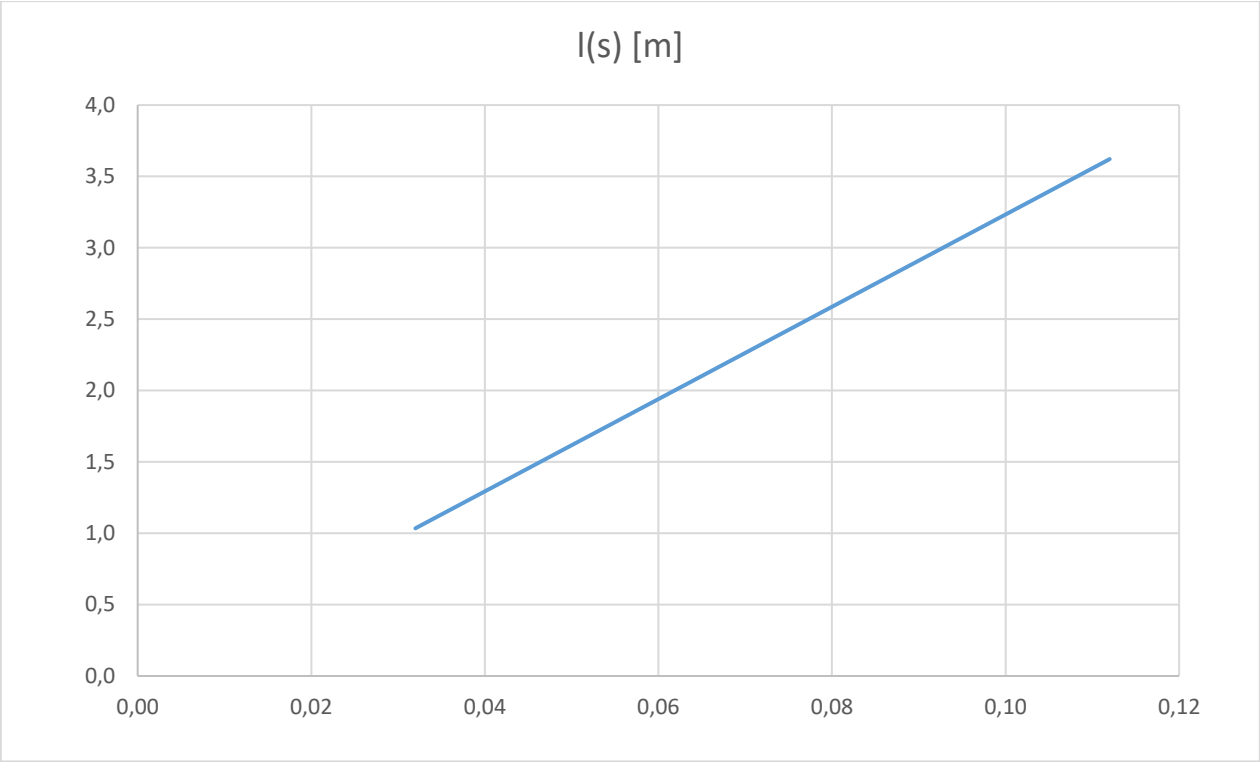

*Figura 3.3 – andamento di **l** in funzione di **s***

Come già anticipato dunque si verifica un aumento di **u** all'aumentare della distanza tra gli specchi, ed allo stesso tempo per ottenere una stessa area di proiezione, di dimensione a fissata, all'aumentare di **s**, bisogna posizionare gli specchi più lontani rispetto alla parete.

Nella seguente tabella invece si è analizzato l'andamento della risoluzione **u** e della distanza **l** incrementando l'area di proiezione, e dunque la dimensione **a**, tenendo fissi tutti gli altri parametri.

	m/°	m/°	m/°	m/°	m/°	m/°	m/°	m/°	m/°
a	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
L	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
s	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015
Δx	0,085	0,135	0,185	0,235	0,285	0,335	0,385	0,435	0,485
l	0,085	0,135	0,185	0,235	0,285	0,335	0,385	0,435	0,485
α_{lim}	45	45	45	45	45	45	45	45	45
β	45	45	45	45	45	45	45	45	45
β'	44,1	44,1	44,1	44,1	44,1	44,1	44,1	44,1	44,1
α'	88,2	88,2	88,2	88,2	88,2	88,2	88,2	88,2	88,2
v	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
Δx'	0,0027	0,0042	0,0058	0,0074	0,0090	0,0105	0,0121	0,0137	0,0152
u	0,0031	0,0047	0,0063	0,0079	0,0094	0,0110	0,0126	0,0141	0,0157

Tabella 3.3 – Variazione della grandezza dell'area di proiezioni

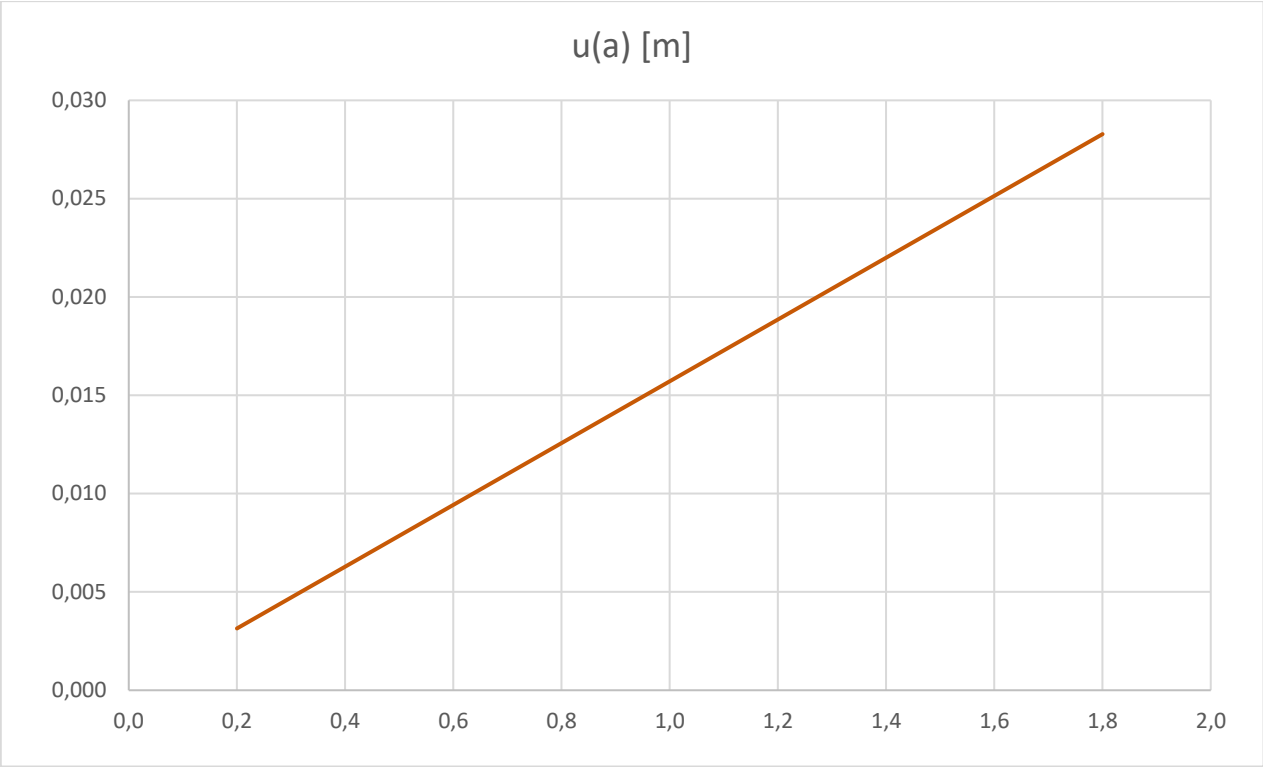

*Figura 3.4 – Andamento di **u** in funzione di **a***

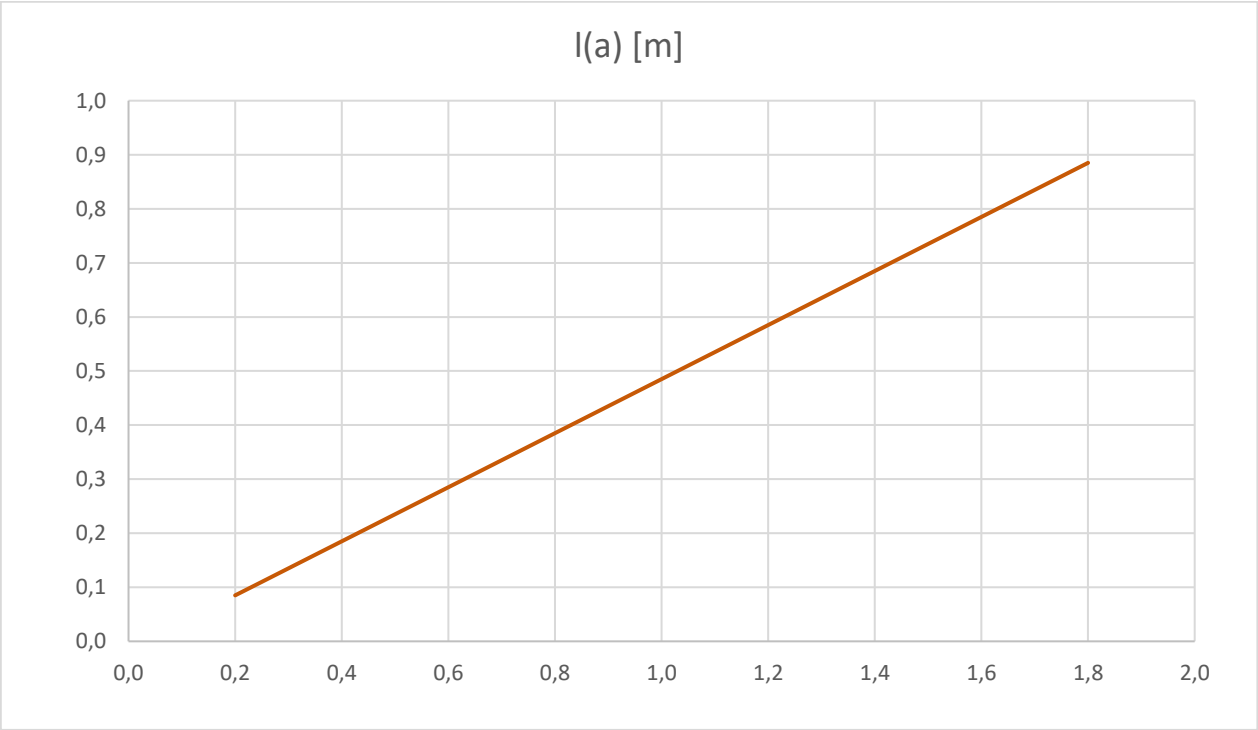

*Figura 3.5 – Andamento di **l** in funzione di **a***

All'aumentare di **a** ovviamente la risoluzione diminuisce ed è richiesta una distanza **l** rispetto alla parete sempre crescente.

In seguito si utilizza come variabile la distanza **s** tra gli assi dei due specchi e si studia l'andamento della risoluzione, come sempre, ma questa volta si preferisce analizzare invece come varia la superficie di proiezione all'aumentare di **s**.

	m/°	m/°	m/°	m/°	m/°	m/°	m/°	m/°	m/°
s	0,015	0,020	0,025	0,030	0,035	0,040	0,045	0,050	0,055
L	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
l	0,085	0,085	0,085	0,085	0,085	0,085	0,085	0,085	0,085
α_{lim}	56,34	63,43	68,20	71,57	74,05	75,96	77,47	78,69	79,70
Δx	0,0567	0,0425	0,0340	0,0283	0,0243	0,0213	0,0189	0,0170	0,0155
a	0,1333	0,1050	0,0880	0,0767	0,0686	0,0625	0,0578	0,0540	0,0509
β	45	45	45	45	45	45	45	45	45
β'	44,1	44,1	44,1	44,1	44,1	44,1	44,1	44,1	44,1
α'	88,2	88,2	88,2	88,2	88,2	88,2	88,2	88,2	88,2
v	0,0005	0,0006	0,0008	0,0009	0,0011	0,0013	0,0014	0,0016	0,0017
Δx'	0,0027	0,0027	0,0027	0,0027	0,0027	0,0027	0,0027	0,0027	0,0027
u	0,0031	0,0033	0,0035	0,0036	0,0038	0,0039	0,0041	0,0042	0,0044

Tabella 3.3 – Variazione della distanza tra i due specchi

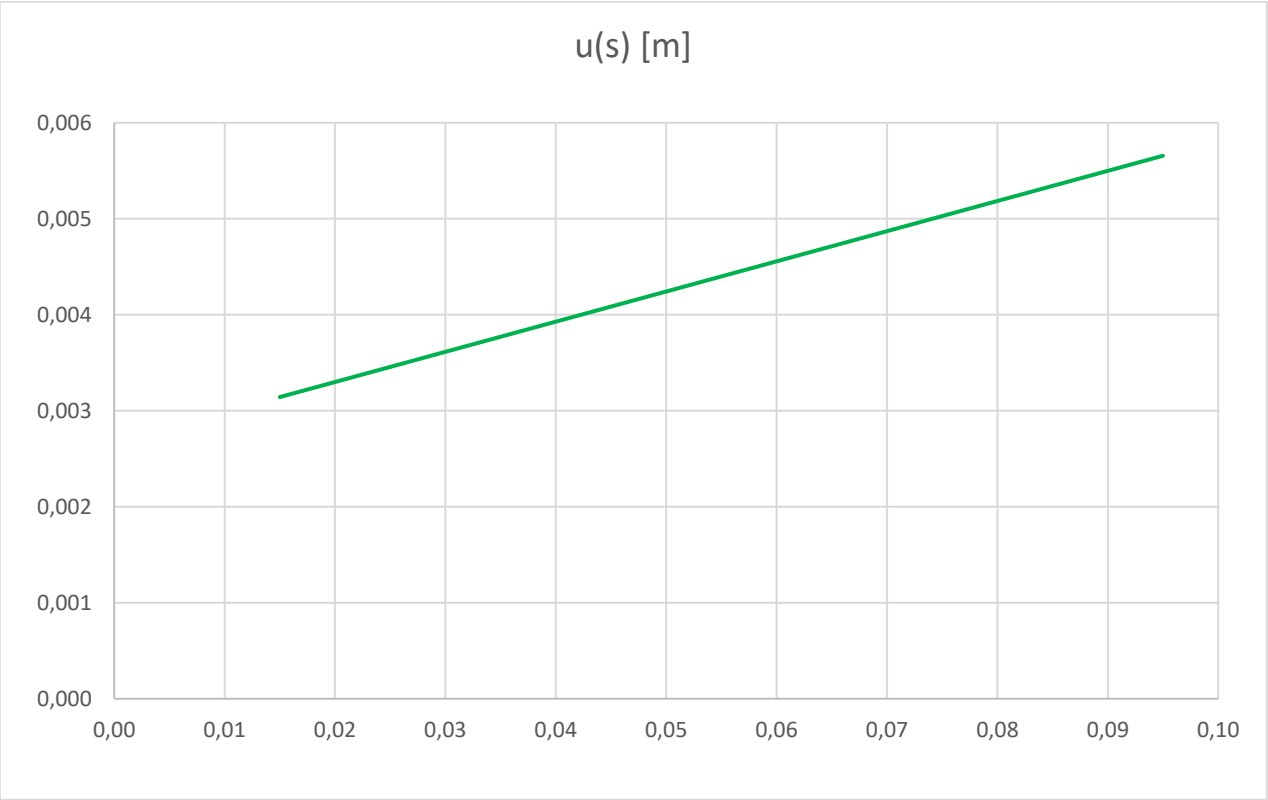

*Figura 3.5 – Andamento di **u** in funzione di **s***

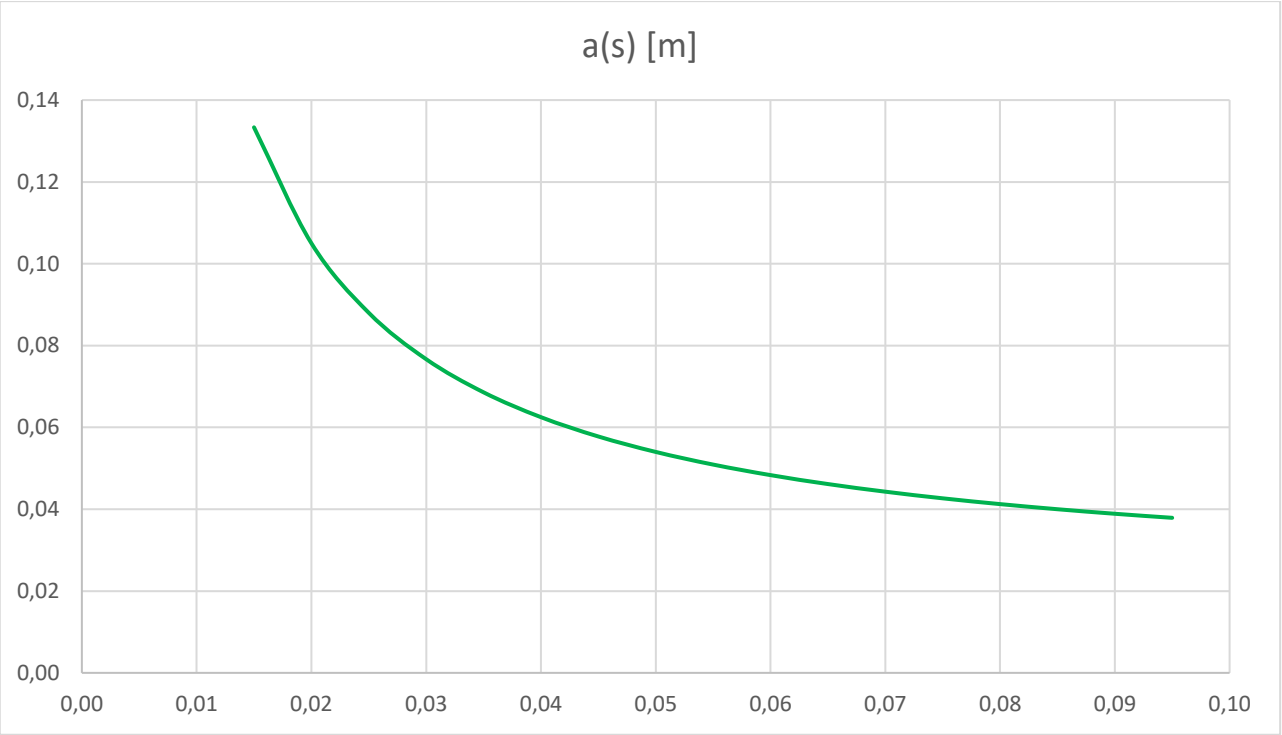

*Figura 3.5 – Andamento di **a** in funzione di **s***

Il dato interessante questa volta è che aumentando il valore di **s** diminuisce la dimensione **a** orizzontale con un andamento quasi iperbolico, dunque avvicinando il più possibile i due specchi possiamo proiettare forme sempre più ampie.

Infine si varia l'ultimo parametro rimasto, ossia la distanza tra specchi e parete **l**, e si riportano i valori di **u** ed **a** corrispondenti.

	m/°	m/°	m/°	m/°	m/°	m/°	m/°	m/°	m/°
s	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015
L	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
l	0,085	0,100	0,115	0,130	0,145	0,160	0,175	0,190	0,205
α_{lim}	45	45	45	45	45	45	45	45	45
Δx	0,085	0,100	0,115	0,130	0,145	0,160	0,175	0,190	0,205
a	0,20	0,23	0,26	0,29	0,32	0,35	0,38	0,41	0,44
β	45	45	45	45	45	45	45	45	45
β'	44,1	44,1	44,1	44,1	44,1	44,1	44,1	44,1	44,1
α'	88,2	88,2	88,2	88,2	88,2	88,2	88,2	88,2	88,2
v	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
Δx'	0,0027	0,0031	0,0036	0,0041	0,0046	0,0050	0,0055	0,0060	0,0064
u	0,0031	0,0036	0,0041	0,0046	0,0050	0,0055	0,0060	0,0064	0,0069

Tabella 3.4 – Variazione della distanza tra gli specchi e la parete

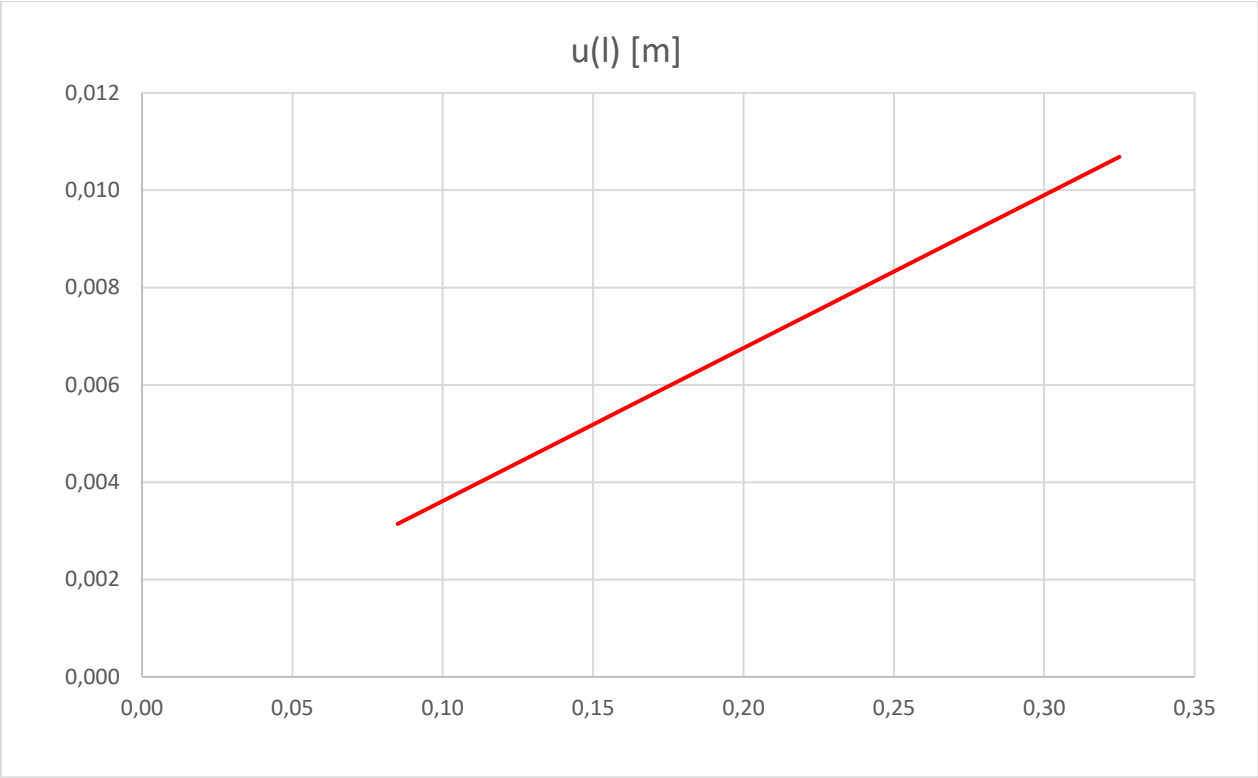

*Figura 3.6 – Andamento di **u** in funzione di **l***

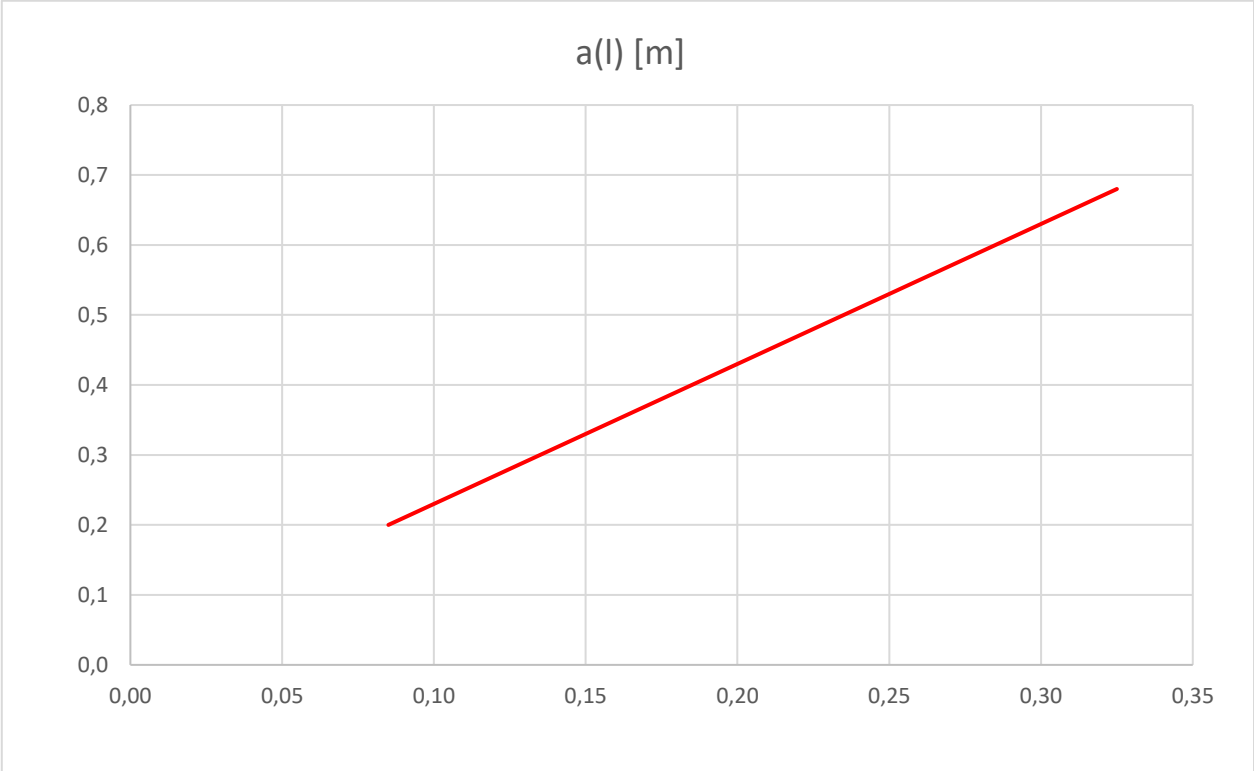

*Figura 3.7 – Andamento di **a** in funzione di **l***

In questo caso il risultato è abbastanza ovvio visto che, allontanando gli specchi dalla parete, ad una minima rotazione di uno dei due assi si ha una variazione della posizione del puntatore sulla parete

sempre più grande, ed allo stesso tempo chiaramente la dimensione a tenderà ad aumentare con andamento pressoché lineare.

In base ad i risultati ottenuti, immaginando di voler ottenere un'area di proiezione di dimensione pari ad 1 metro, si scelgono degli specchi quadrati di dimensione 3x3cm^2, e posizionando gli assi il più vicino possibile tra loro, ossia evitando il contatto tra gli specchi durante la rotazione, si ottiene una risoluzione di 2,1 cm, con **l** che sarà pari circa a 1 metro. Bisogna però ricordare che per questi calcoli si è considerato il funzionamento dei motori stepper a full step, ossia considerando il caso peggiore in cui la risoluzione dei singoli motori è minima e dunque il più piccolo movimento che ciascuno di essi riesce a fare è pari a 0,9° (in full step 200 step corrispondono ad una rotazione di 360°).

3.2 Realizzazione

Il passo successivo consiste nel progettare un'adeguata struttura di sostegno per i due motori, che garantisca un allineamento degli specchi tale da rispettare i parametri fissati nella prima fase di progetto.

Per la realizzazione del modello 3D viene utilizzato SolidWorks, generando così una prima geometria semplice ad L, che consenta dunque un adeguato fissaggio dei motori passo-passo alla carcassa mediante delle viti M3 ed inoltre un certo dislivello tra i due assi di rotazione in modo da rispettare il parametro s stabilito in precedenza. La forma della struttura di supporto, in particolare dei due alloggiamenti realizzati per i motori stepper, viene realizzata in base ai dati geometrici fornitici dal costruttore dei motori.

Come detto i motori che verranno utilizzati nell'esperimento sono due motori stepper (motori passo-passo), Nema 17 sm42ht47-1684b, la cui scheda tecnica è riportata nella seguente pagina web http://shop.myhobby-cnc.de/media/pdf/nema17.pdf.

Con tali motori sarà possibile disporre però di una coppia abbastanza bassa, ma ciò si sposa bene con il compito che essi stessi andranno a eseguire.

Nella fase di progettazione si cerca di tenere in considerazione il fatto che a causa del peso dei motori la struttura potrebbe ribaltarsi, ma allo stesso tempo si vuole creare un ingombro non troppo eccessivo. Per questa ragione si posiziona il centro di gravità della struttura nella parte anteriore, cioè

dove vengono posizionati i motori, in modo da non creare un braccio, e quindi un momento che renda la struttura instabile.

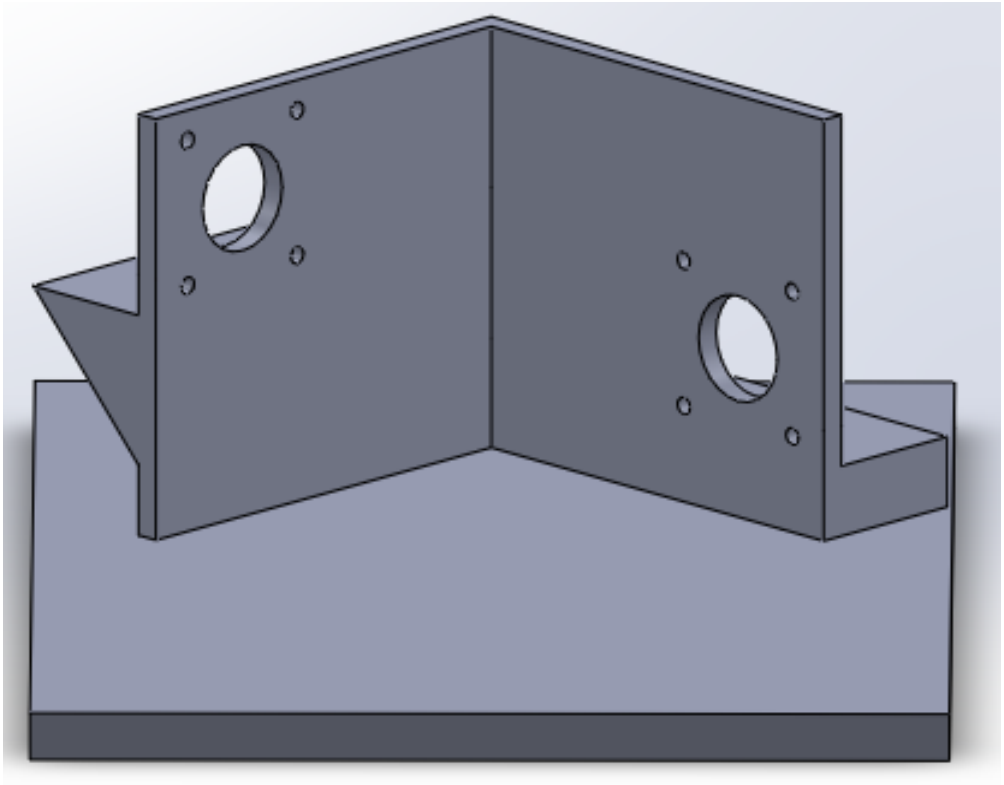

Figure 3.8 – Struttura di supporto dei motori, vista A

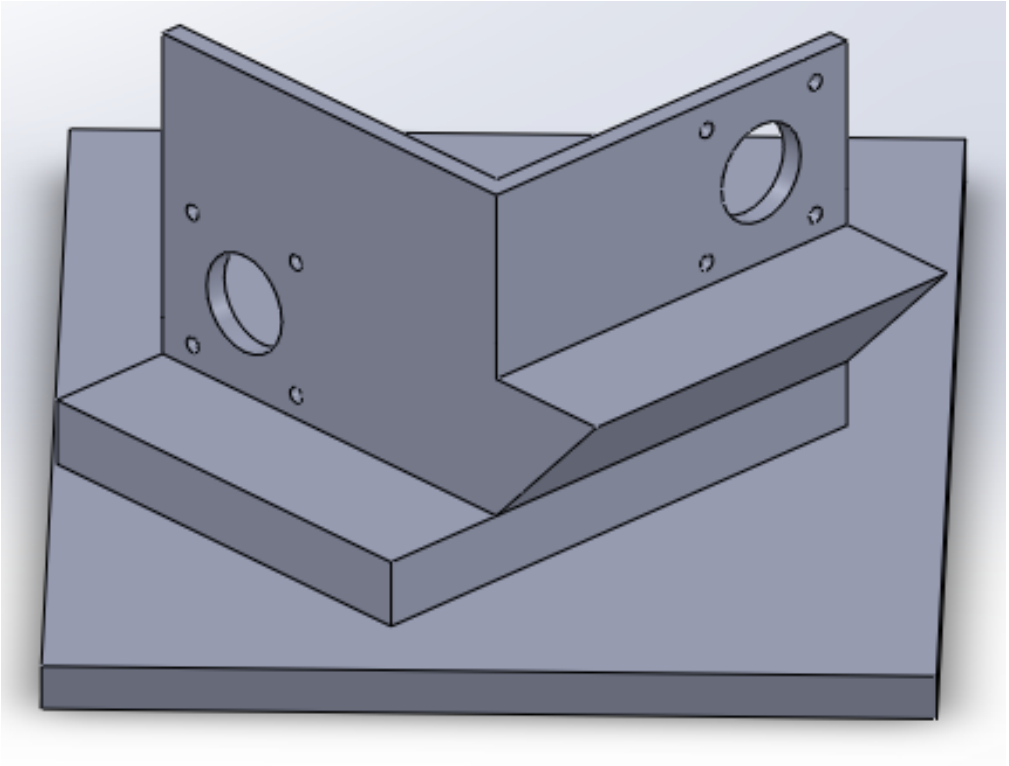

Figure 3.9 – Struttura di supporto dei motori, vista A

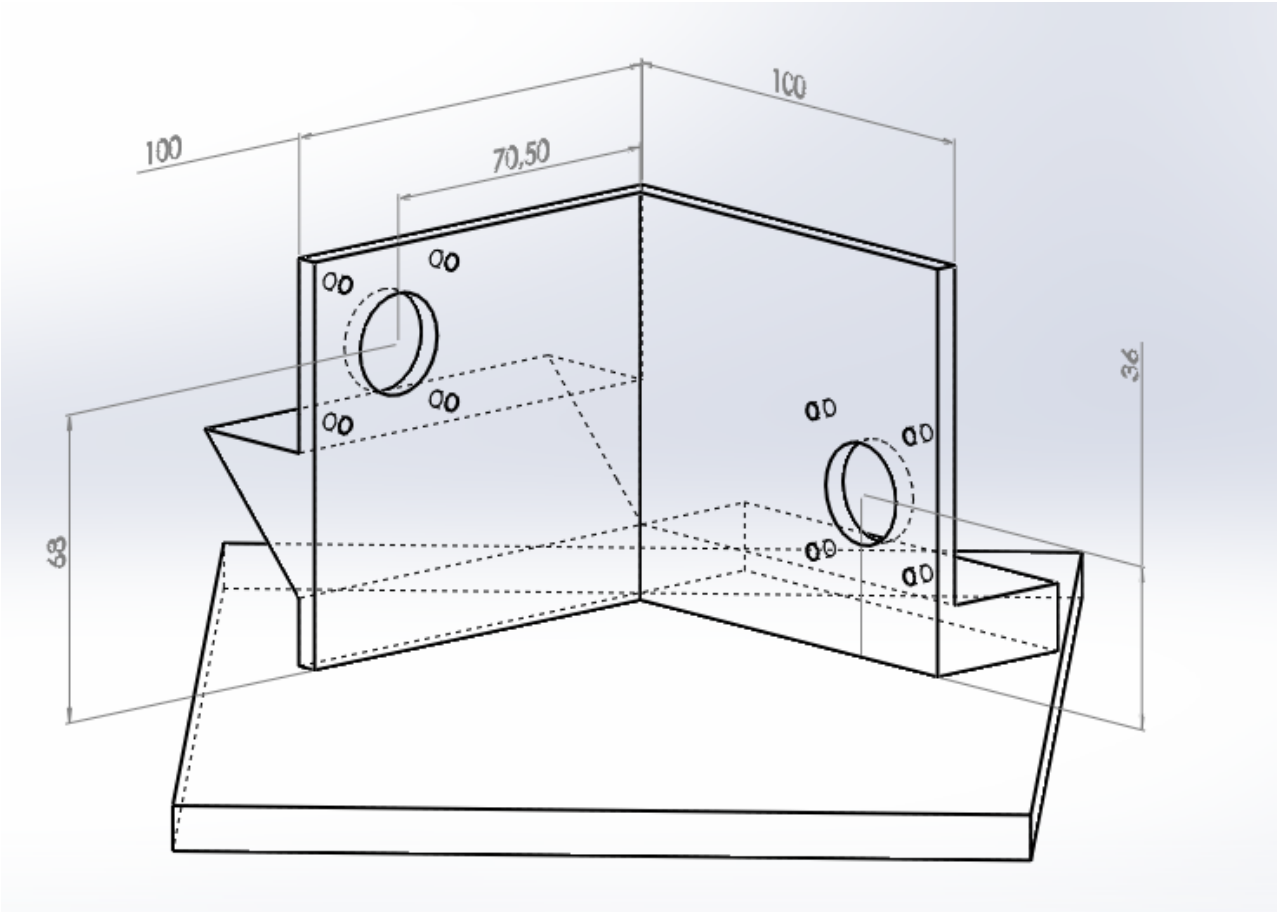

Figure 3.10 – Struttura di supporto dei motori, dimensioni significative riportate in millimetri

Oltre alla struttura che consenta di reggere i due motori stepper è anche necessario un supporto per ciascuno dei due specchi, che sia accoppiabile mediante un giunto (coupling) all'asse di ogni singolo motore, così che possano ruotare anch'essi in seguito alla rotazione dell'albero dei due motori.

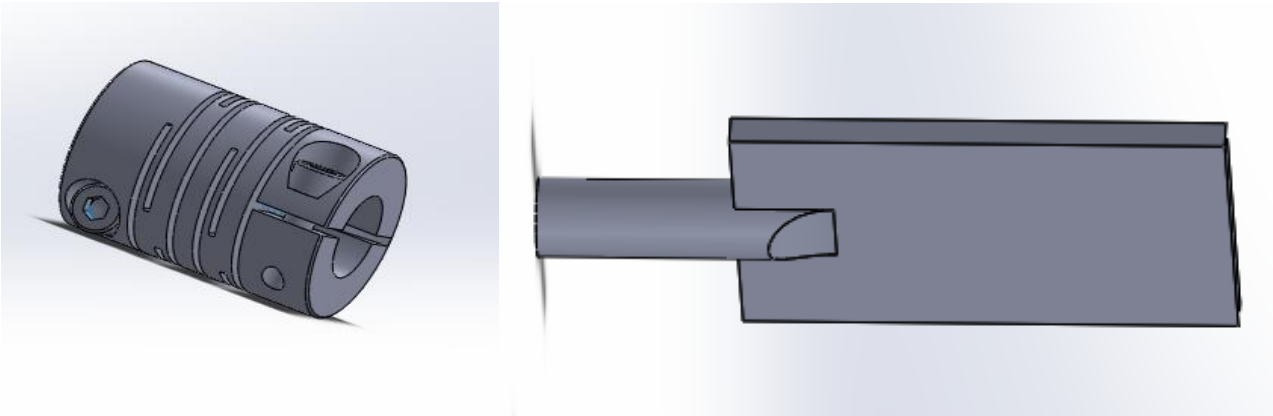

Figura 3.11 – A sinistra il coupling, a destra il supporto per gli specchi

Ciascuno specchio viene quindi adagiato sul relativo supporto ed il fissaggio può essere realizzato utilizzando un qualsiasi collante dato che il peso degli specchi non è un parametro da tenere in considerazione.

La parte cilindrica dei due supporti in fase di montaggio viene fatta scorrere all'interno della cavità del coupling e fissata, avvitando il bullone presente, in modo che i centri dei due specchi si trovino sulla stessa verticale.

Sarà necessario infine realizzare un supporto anche per il laser, che viene realizzato a parte rispetto alla struttura di sostegno dei motori, in modo che, in caso ci fosse la necessità di sostituire il puntatore, non sarebbe richiesta la riprogettazione dell'intero complessivo, ma soltanto della parte ad esso relativa. Tutto ciò è anche preferibile da un punto di vista economico in quanto ristampare l'intera struttura chiaramente richiederebbe tempo e materiale in più, non necessario.

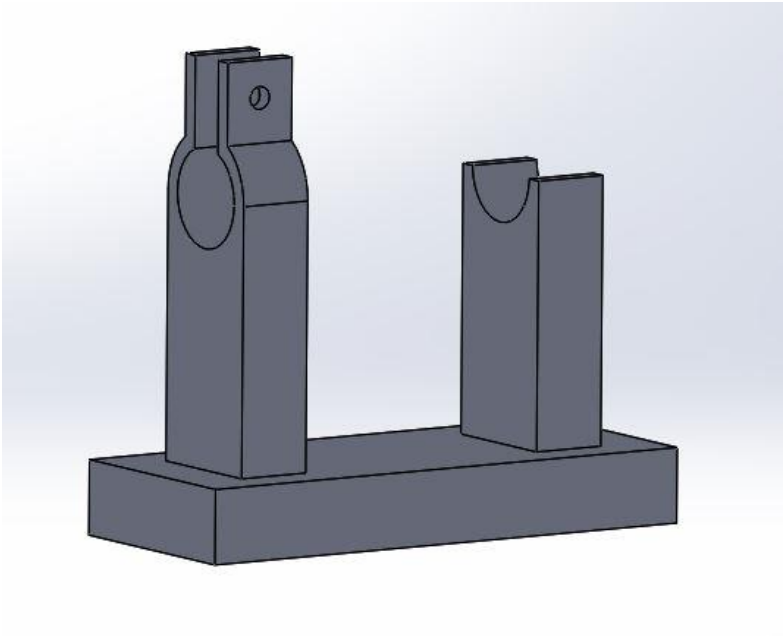

Figura 3.12 – Supporto per il laser

È molto importante in questo caso considerare l'altezza alla quale deve essere posizionato il laser, che è quella che faccia in modo che il puntatore del laser incida il più precisamente possibile il centro del primo specchio.

La forma ad U del primo supporto e la presenza dei due fori passanti nella parte superiore consentono, una volta posizionato il laser, di fissarlo stabilmente utilizzando un semplice sistema vite-bullone.

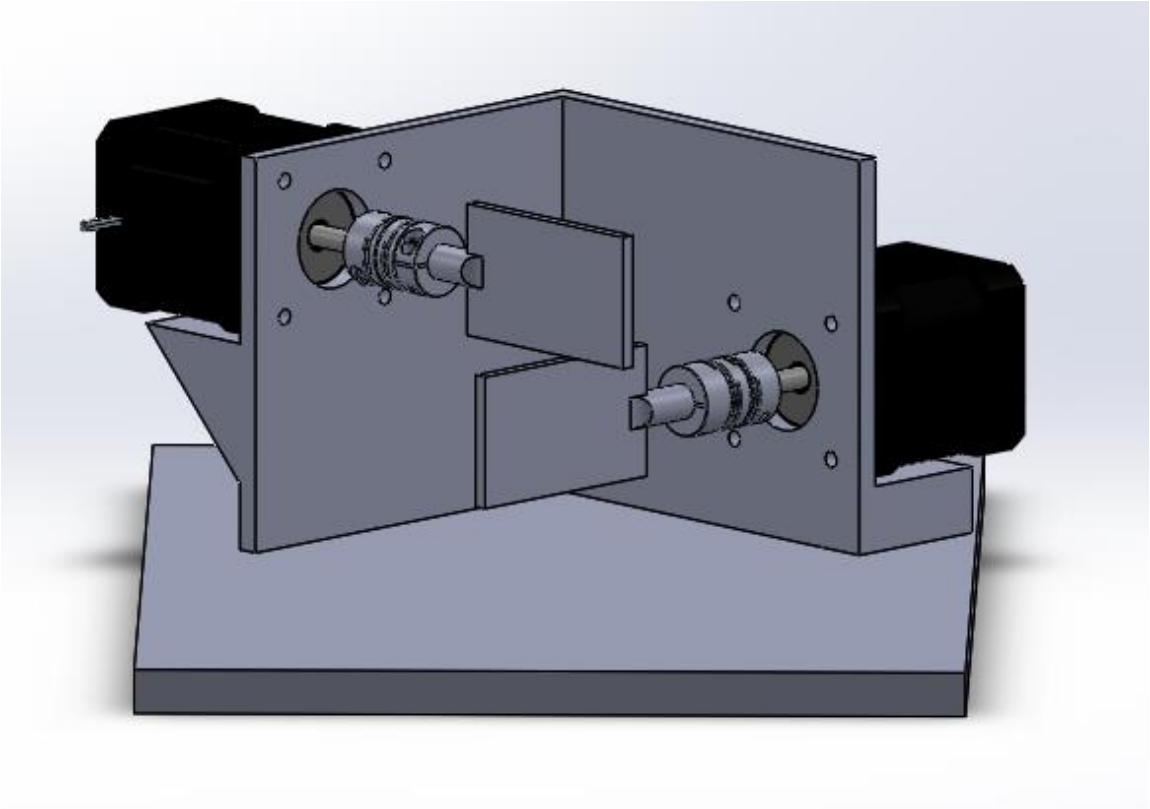

Figura 3.13 – Modello CAD completo

Il passo successivo alla realizzazione del modello CAD è quello di procedere con la prototipazione dei vari pezzi. La stampante che viene utilizzata è della casa produttrice BCN3D, modello Sigma (*Figura 2.4)*. La tecnica di fabbricazione è la fused deposition modeling (FDM), già descritta nel capitolo relativo alla produzione additiva.

Per riuscire a comunicare con la stampante è necessario chiaramente l'utilizzo di un programma generatore di g-code, nel caso specifico il programma utilizzato è stato cura BCN3D, fornito dalla stessa casa produttrice della stampante utilizzata. Grazie a tale software è possibile impostare il posizionamento del pezzo durante la fase di costruzione e gestire l'eventuale presenza di supporti. Nel caso presente i supporti non sono necessari su tutta la struttura in quanto i fori più piccoli sono di dimensioni contenute ed è dunque preferibile realizzarli privi di supporti per evitare di andare ad alterare la loro forma durante la rimozione manuale degli stessi. In ogni caso i supporti, realizzati dello stesso materiale del pezzo, compongono una struttura molto meno densa di materiale per evitare di distorcere il pezzo stampato; essi saranno necessari sul lato obliquo, ossia sul supporto del secondo motore, quello che si trova più in alto.

Nel menù del programma citato è richiesto inoltre di fissare alcuni parametri:

- Densità del materiale

- Spessore di ogni strato di materiale depositato
- Spessore del bordo esterno del pezzo (in inglese shelly, conchiglia)

Chiaramente prima di poter definire dei valori per tali parametri bisogna essere a conoscenza di che tipologia di estrusore si ha a disposizione. Si è scelto di utilizzare un estrusore avente un diametro di 5 mm; diametri troppo piccoli portano a tempi di lavorazione molto lunghi e vengono utilizzati soltanto nel caso in cui sia richiesta un'attenzione al dettaglio molto più elevata rispetto a questo progetto.

Ai vari pezzi non sono richieste particolari proprietà meccaniche, dunque il materiale che verrà utilizzato è il PLA, sotto forma di filamento avvolto in una bobina, che oltre ad essere decisamente economico garantisce anche una certa elasticità, caratteristica importante per la struttura di supporto del laser, che per come è realizzata dovrà avere una certa deformabilità nel montaggio.

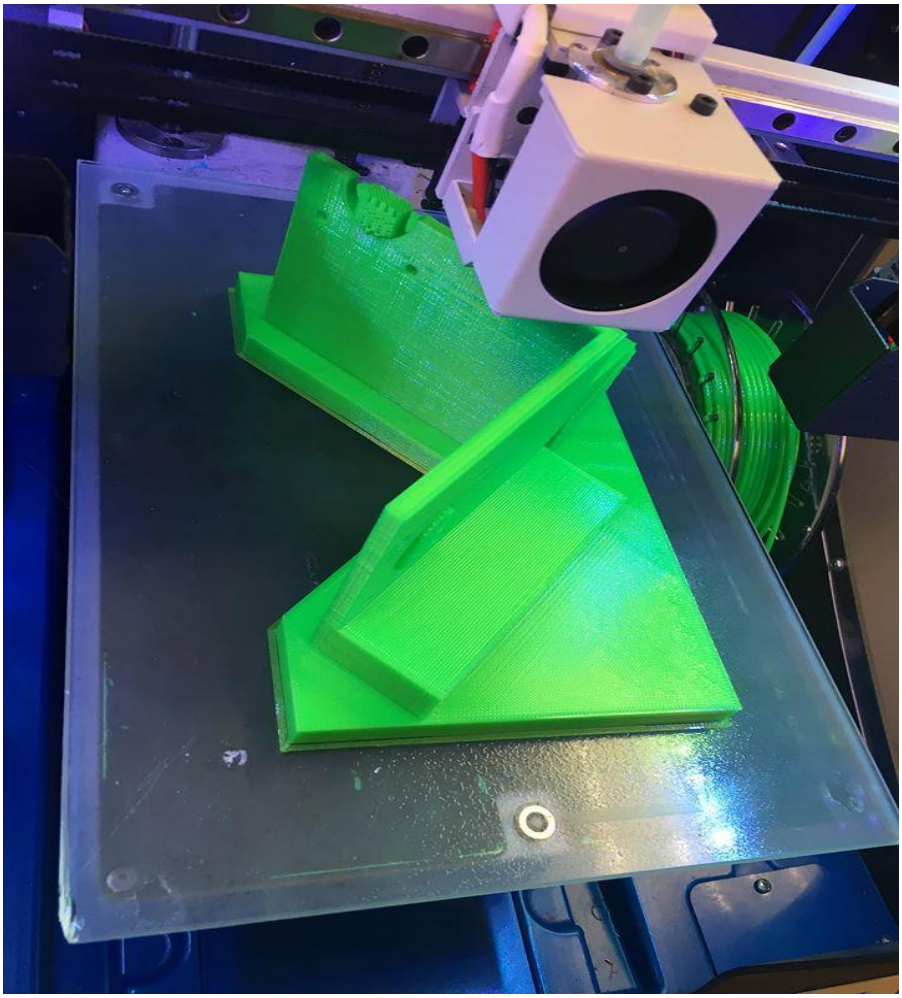

Figura 3.14 – Complessivo in fase di stampa

3.3 Montaggio

Una volta realizzati i vari pezzi in 3D si procede con il montaggio dei componenti. È consigliabile procedere nel seguente ordine:

1. Prima di tutto vengono fissati i due motori alla carcassa utilizzando 4 viti M3, che vengono inserite nei fori passanti realizzati in fase di progetto del pezzo e avvitate nei 4 alloggiamenti di cui ciascun motore dispone. Il fissaggio dei motori è un'operazione molto importante in quanto durante il funzionamento si generano parecchie vibrazioni che, nel caso in cui i motori non fossero ben fissati porterebbero ad un disallineamento degli assi e ciò causerebbe ovviamente grossi problemi nella proiezione dell'immagine.

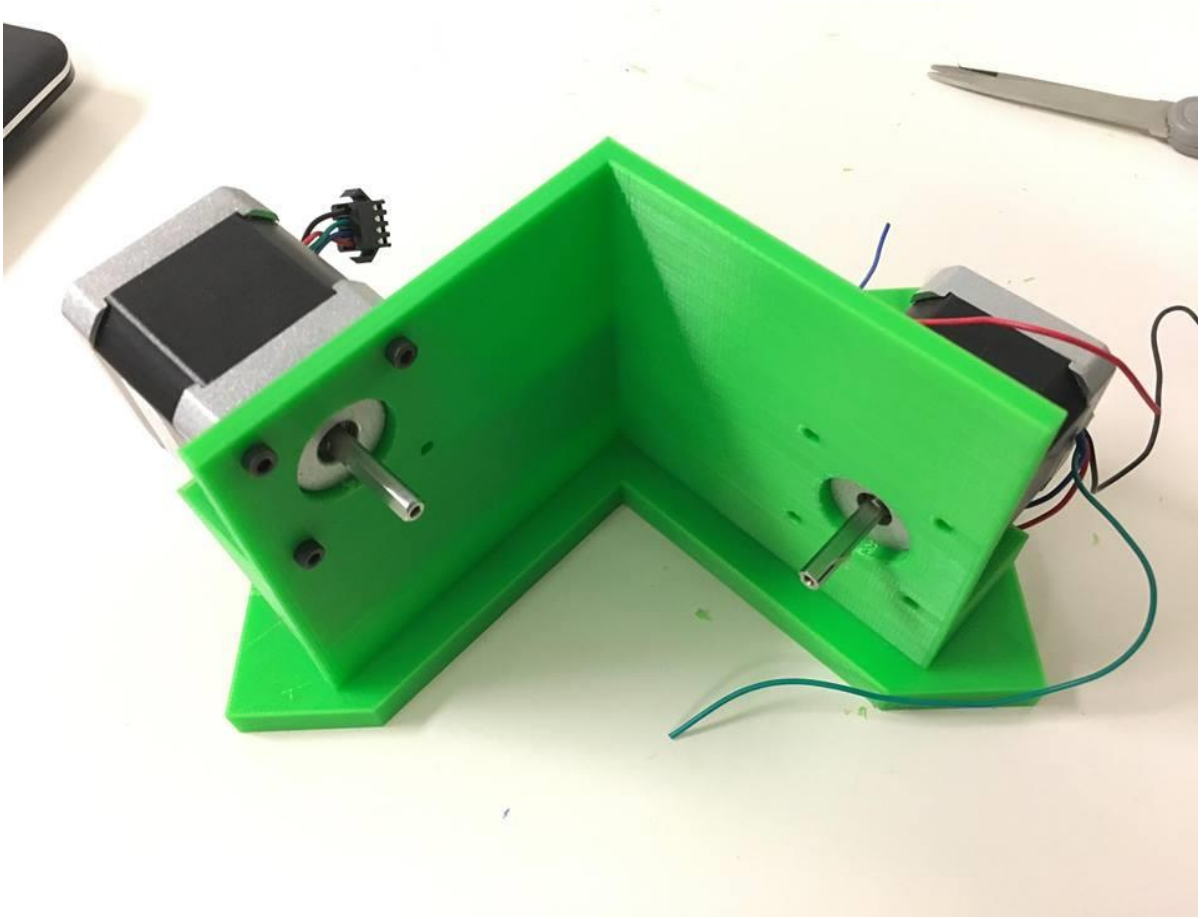

Figura 3.15 – Fissaggio dei motori alla carcassa

2. I due specchi, come detto, vengono applicati sul relativo supporto utilizzando una qualsiasi colla a presa rapida oppure, come nel presente caso, utilizzando una pasta adesiva.

3. Il coupling riportato in *Figura 3.11* presenta due fori di diametri differenti (di 5 e 8 mm); all'interno del più piccolo viene inserito l'alberino di ognuno dei due motori e avvitando il bullone si completa l'accoppiamento nella posizione che si desidera. Dall'altro lato, invece, viene il cilindro facente parte del supporto dello specchio. È importante in questo caso, durante il montaggio, realizzare un corretto allineamento tra i due specchi, in modo che le relazioni geometriche riportate nel primo capitolo di questa tesi continuino ad essere rispettate.
4. Il laser a disposizione viene posizionato sul proprio supporto e fissato grazie ad un sistema vite-bullone, come già anticipato.

Il passo successivo è quello di connettere i due motori. La piattaforma che viene utilizzata per comandare i due motori è ArduinoUNO.

Figura 3.16 – ArduiniUNO

I pin in alto, numerati da 0 a 13, vengono collegati con l'utenza con cui si desidera comunicare per inviare impulsi e dunque "informazioni", mentre in basso si chiude il circuito collegando due pin, uno nella porta che rilascia 5Volt e l'altro con Ground.

L'interfaccia che consente a ciascun motore stepper di comunicare con Arduino è il driver della DRV8825, della Pololu, che viene posizionato su di una breadboard. Abbiamo tanti driver quanti sono i motori. In seguito è riportato lo schema che fornisce la casa produttrice relativo ai collegamenti.

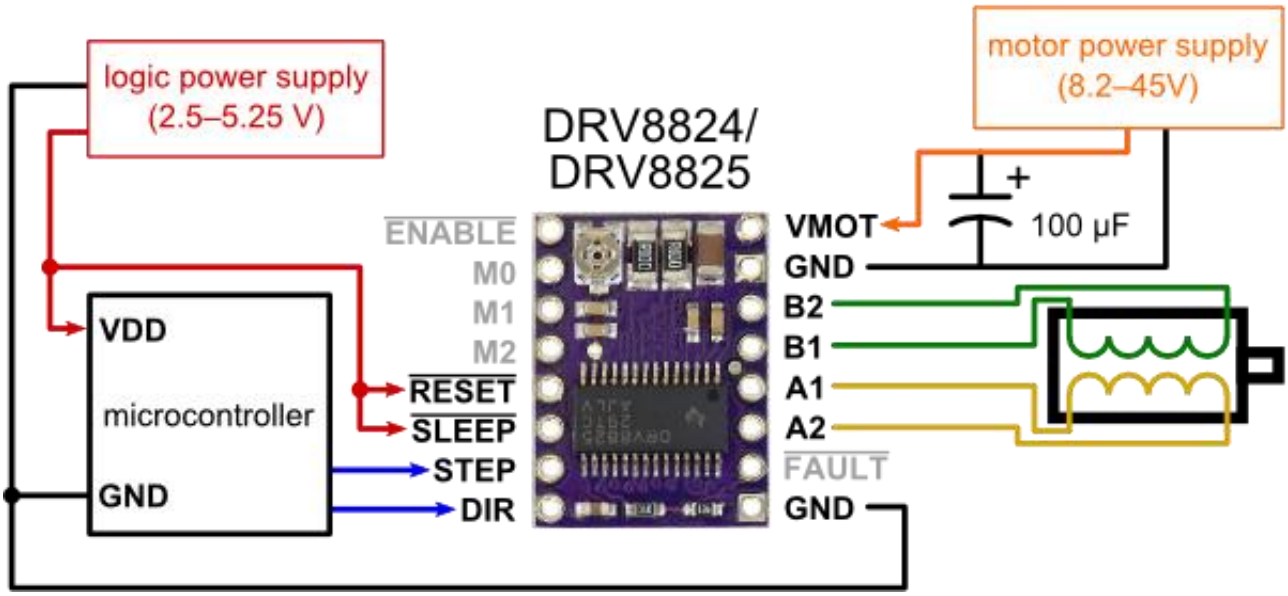

Figura 3.17 – Schema dei collegamenti del driver drv8825

Nei fori della breadboard adiacenti ai pin B2, B1, A1, A2 bisogna collegare opportunamente ciascun motore, sfruttando le informazioni riportate nella descrizione delle caratteristiche del motore.

Il pin DIR è quello che stabilisce il senso di rotazione dell'albero mentre il pin STEP indica quanto il motore debba ruotare.

I pin M0, M1, M2 invece servono per far funzionare il motore in microstepping, ossia a seconda di come vengono collegati (cioè quali vengono posti "HIGH", a 5Volt, e quali "LOW", a ground) varia il minimo movimento possibile che può realizzare il motore, in particolare:

MODE0	MODE1	MODE2	Microstep Resolution
Low	Low	Low	Full step
High	Low	Low	Half step
Low	High	Low	1/4 step
High	High	Low	1/8 step
Low	Low	High	1/16 step
High	Low	High	1/32 step
Low	High	High	1/32 step
High	High	High	1/32 step

Tabella 3.5 – Collegamenti per il microstepping

Il funzionamento in microstepping dunque consente un netto miglioramento della risoluzione del motore e di conseguenza della risoluzione u del proiettore laser in generale.

Il generatore di corrente, riportato in alto a destra in *Figura 3.17*, è un semplice trasformatore che fornisce una corrente alternata di 1A, con una differenza di potenziale variabile tra gli 8 ed i 20 Volt.

Tra alimentatore e driver bisogna collegare una capacità di 100 µF.

Sono state utilizzate due breadbord per cercare di ottenere un ordine maggiore, così da poter effettuare un controllo sui vari collegamenti molto più rapido, ed evitare interferenze, anche se soltanto una sarebbe stata sufficiente

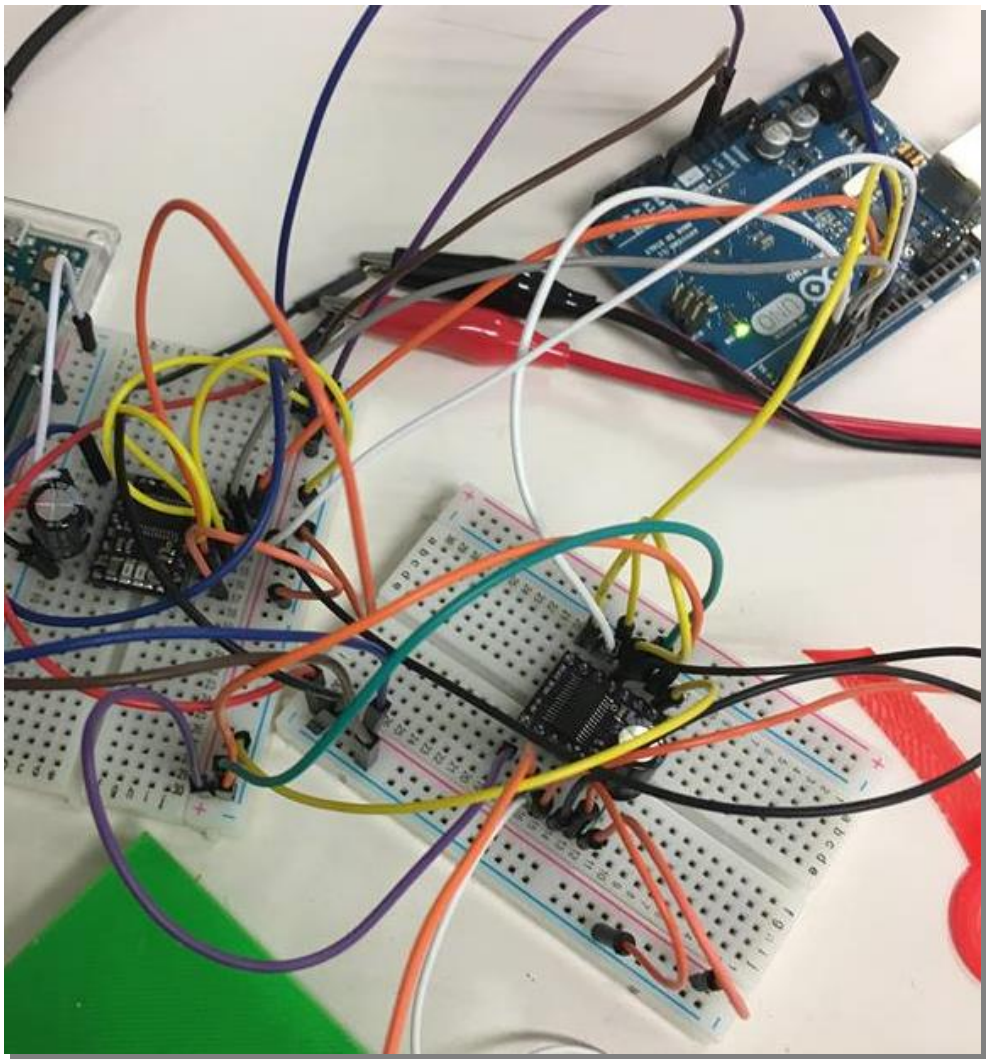

Figura 3.18 – Connessioni

3.4 Programmazione in C

Ultimati tutti i collegamenti si passa alla parte software. Inizialmente l'obiettivo è semplicemente quello di provare il corretto funzionamento della macchina, facendo compiere dunque al laser geometrie semplici, come cerchi, quadrati ed altri profili elementari; per questo è sufficiente una programmazione in linguaggio C compatibile con Arduino.

3.4.1 Test di funzionamento

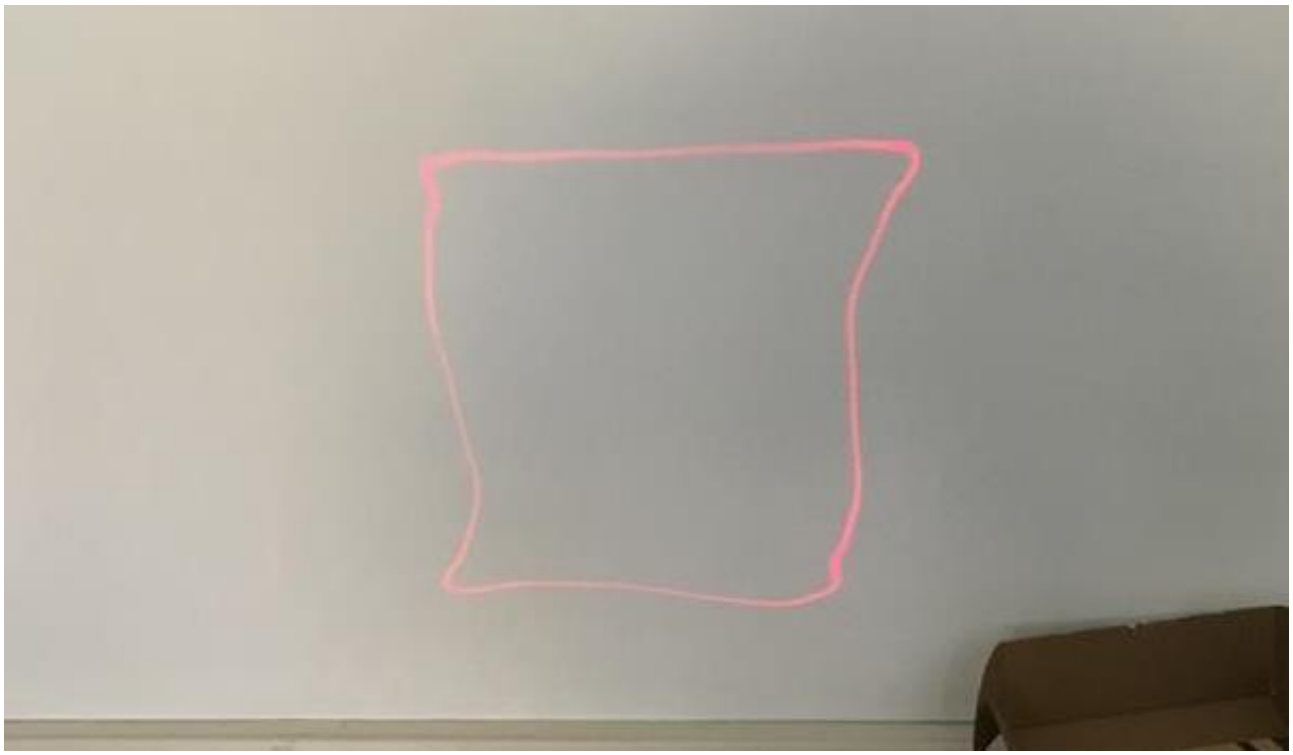

Figura 3.20 – Prima proiezione, quadrato

L'ultima foto è stata scattata durante la prova effettuata con il codice C relativo al quadrato appena riportato. La realizzazione del quadrato è molto semplice in quanto viene fatto muovere un solo specchio per volta, prima in una direzione e poi nell'atra, per un certo numero di cicli. Nonostante ciò il risultato ottenuto è comunque soddisfacente essendo appena la prima fase della progettazione.

D'altronde però è chiaro che la figura rappresentata non sia esattamente un quadrato. Come si vede, infatti, abbiamo dei problemi principalmente ai vertici del quadrato, cioè quando il puntatore varia la

propria direzione. Ciò è legato alla presenza di eccessive vibrazioni che si generano a causa dell'elevata velocità dei motori che fanno così oscillare l'intera struttura, la quale è composta di un materiale abbastanza rigido per cui tali oscillazioni non sono smorzate con il contatto con la base di appoggio. Inoltre anche il coupling non è rigido perché è formato da tanti anelli nella parte centrale che gli conferiscono una certa deformabilità, che serve ad evitare rotture a causa di eccessive sollecitazioni. I supporti dei due specchi si trovano a sbalzo e quindi inevitabilmente durante la rotazione, specialmente ad elevate velocità, tendono a flettersi.

Oltre alle vibrazioni sono stati riscontrati altri problemi durante il funzionamento che riguardano il microstepping; si è notato, ad esempio, che i motori a disposizione non sono in grado di garantire un controllo al livello del 32° di passo, mantenendo sempre la stessa risoluzione e dunque senza perdere il riferimento. Nonostante ciò però, effettuando vari test, si è deciso di continuare con il funzionamento a microstepping perché sebbene non sia particolarmente performante è comunque più preciso rispetto al funzionamento in full step, il quale approssima in maniera peggiore soprattutto le figure curve.

3.5 BCNC

Testato il pezzo progettato e poi ottenuto grazie alla fabbricazione additiva il passo successivo è quello di poter proiettare a parete geometrie sempre più complesse con il grado di precisione che i mezzi a disposizione consentono. Per fare ciò non è più sufficiente scrivere un programma manualmente in linguaggio C e compilarlo tramite Arduino perché chiaramente per forme più complesse rispetto a quelle basiche, descritte in precedenza, sarebbero richiesti un tempo ed uno sforzo eccessivo. Di conseguenza nasce la necessità di avere un software che sia in grado di leggere una qualsiasi curva, che dunque si comporta come un input per il programma, ed automaticamente trasformarla, mediante un linguaggio compatibile con il sistema a disposizione, in movimenti dei singoli motori.

Il programma che si è deciso di utilizzare è bcnc; esso solitamente viene utilizzato per il comando di vere e proprie macchine utensili e pertanto prevede il funzionamento a 3 assi, che chiaramente nel presente progetto non è richiesto. bcnc comunica con Arduino mediante un linguaggio CNC, dunque esistono due metodi per poter muovere i motori affinché il laser descriva una generica forma:

1. Si utilizza un programma ausiliario per disegnare quello che vorremmo visualizzare grazie al proiettore. Indifferentemente si è utilizzato nelle varie prove effettuate sia SolidWorks stesso sia inkscape.
2. È possibile mediante una certa sezione del programma comporre il codice CNC manualmente e dunque comandare in maniera diretta i motori.

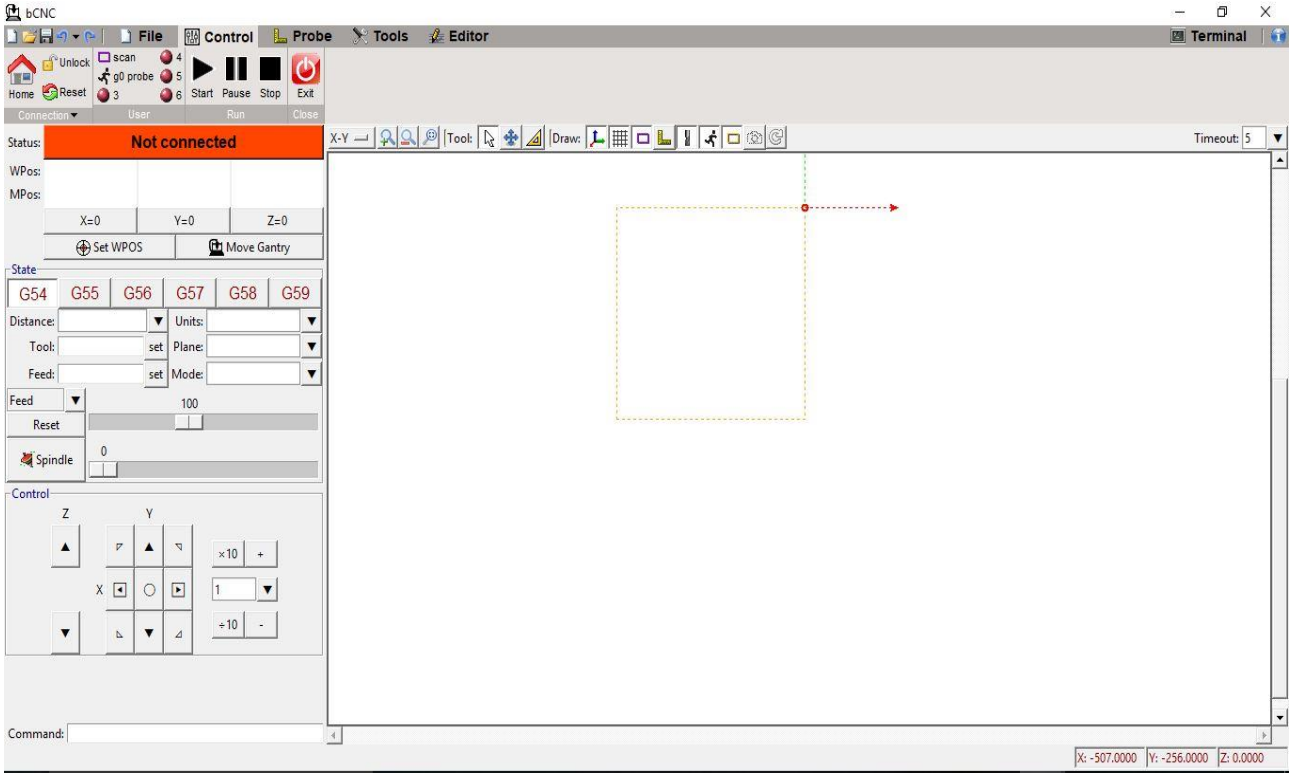

Figura 3.21 – Schermata di controllo di bcnc

Nell' appartato control è possibile appunto comandare direttamente la posizione del puntatore sulla parete intervenendo sulle frecce in x ed in y. Invece in command, come anticipato, c'è la possibilità di inserire un codice in linguaggio CNC per comandare i motori.

Il cerchio rosso tra i due assi indica la posizione di zero, ossia il punto in cui si riporterà il laser al termine di ogni ciclo; chiaramente è possibile assegnare una nuova posizione di zero in qualunque momento.

In tools, in alto, invece è possibile settare alcuni parametri, come per esempio velocità massima di rotazione, accelerazione massima, millimetri per numero di step, massimo valore sull'asse delle x e massimo valore sull'asse delle y.

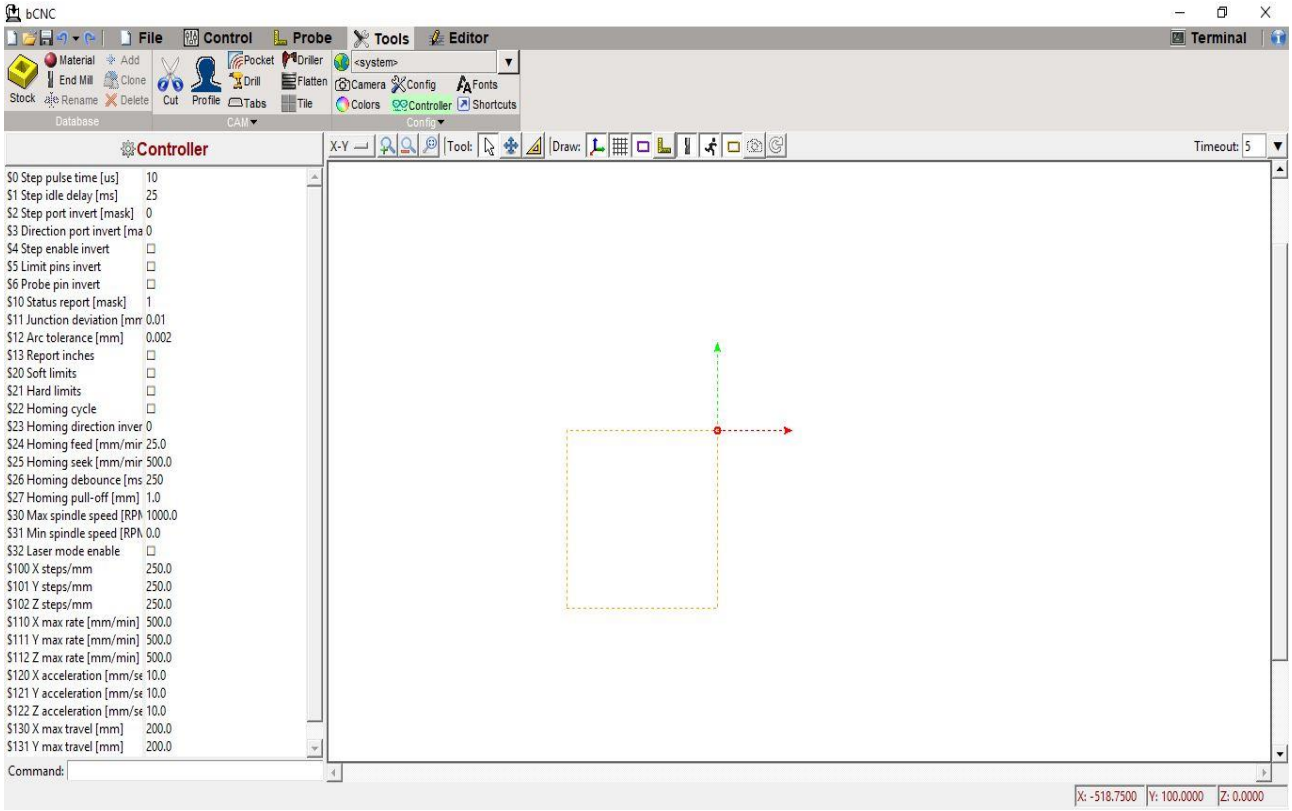

Figura 3.22 – Schermata di impostazione parametri di bcnc

3.5.1 Prove ed analisi dei risultati

Anche in questo caso si è cominciato provando con forme molto semplici per verificare l'effettivo funzionamento del programma; pertanto, più che all'accuratezza della rappresentazioni nella prima parte ci si è focalizzati sul settare in maniera più ottimale possibile i parametri facendo varie prove, e quindi ottimizzando il programma per lo scopo richiesto.

Successivamente si è provato a proiettare geometrie leggermente più complesse come ad esempio un ellisse, una stella o anche una lettera dell'alfabeto (B o P ad esempio). In seguito, in *Figura 3.23*, sono presentati i risultati ottenuti.

Figura 3.23 – Prima prova di proiezione con bcnc

È chiaro che aumentando il grado di complessità delle forme proiettate i difetti che prima erano contenuti adesso diventano molto più consistenti e dunque risulta chiaro che sia necessario intervenire per ridurre specialmente il problema delle vibrazioni, che tende ad alterare eccessivamente la forma, visto che per una questione economica è stato deciso di utilizzare i motori già a disposizione.

4. Struttura secondaria

Una possibile soluzione al problema delle eccessive oscillazione può essere ottenuta modificando il progetto della struttura di sostegno dei motori.

4.1 Modifiche di progetto

Si è pensato infatti di sostituire la struttura ad L, precedentemente utilizzata, con una struttura chiusa, cioè quasi una sorta di cubo cavo all'interno. Tale geometria consente dunque, mediante l'utilizzo di appropriati cuscinetti, ai sistemi di supporto per gli specchi di essere sorretti ad entrambi i lati. Ciò di conseguenza ne impedisce qualsiasi movimento verticale durante il funzionamento, anche ad elevate velocità di rotazione. Nel perimetro esterno della nuova carcassa c'è bisogno di ricavare un foro di dimensioni più grandi, per consentire l'ingresso alla luce laser. Il cubo è sagomato in modo da consentire l'uscita della luce verso la parete su cui si vuole proiettare, e proveniente dal secondo specchio, ossia quello che si trova più in alto tra i due. Inoltre si sono ricavati degli alloggiamenti nei quali andare ad inserire i cuscinetti, che verranno bloccati grazie ad alcune placche, fissate con viti e bulloni. Il supporto degli specchi di conseguenza deve essere anch'esso riprogettato perché dovrà garantire un doppio aggancio ad entrambe le estremità, e ciò si ottiene realizzando un pezzo simmetrico, composto da due alberi di uguale diametro.

Si è scelto di utilizzare dei cuscinetti piccoli a gola profonda, a doppia schermatura (le cui caratteristiche tecniche sono descritte in maniera più dettagliata nel seguente link: https://it.misumi-ec.com/vona2/detail/110300107560/). In particolare il cuscinetto più adatto alle dimensioni della struttura e del supporto per lo specchio al quale verrà accoppiato è risultato quello di dimensioni in millimetri 8; 12; 3,5, che rispettivamente fanno riferimento al diametro esterno, al diametro interno ed allo spessore del cuscinetto.

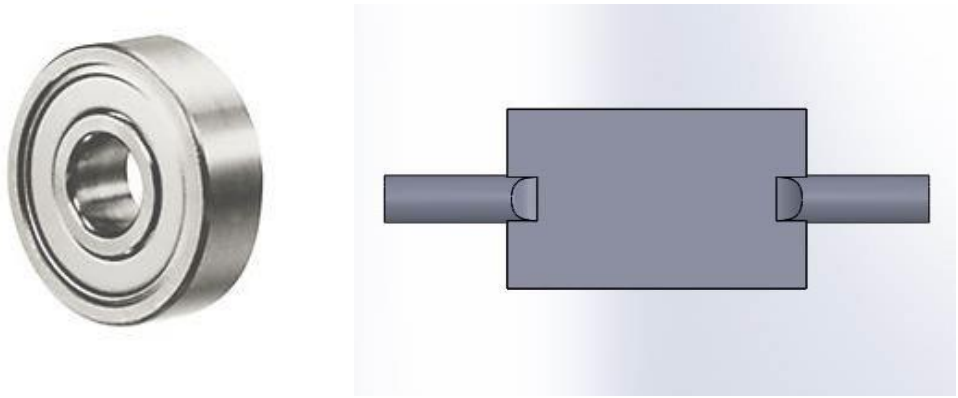

Figura 4.1 – A sinistra il cuscinetto a gola profonda, a destr il nuovo supporto per gli specchi

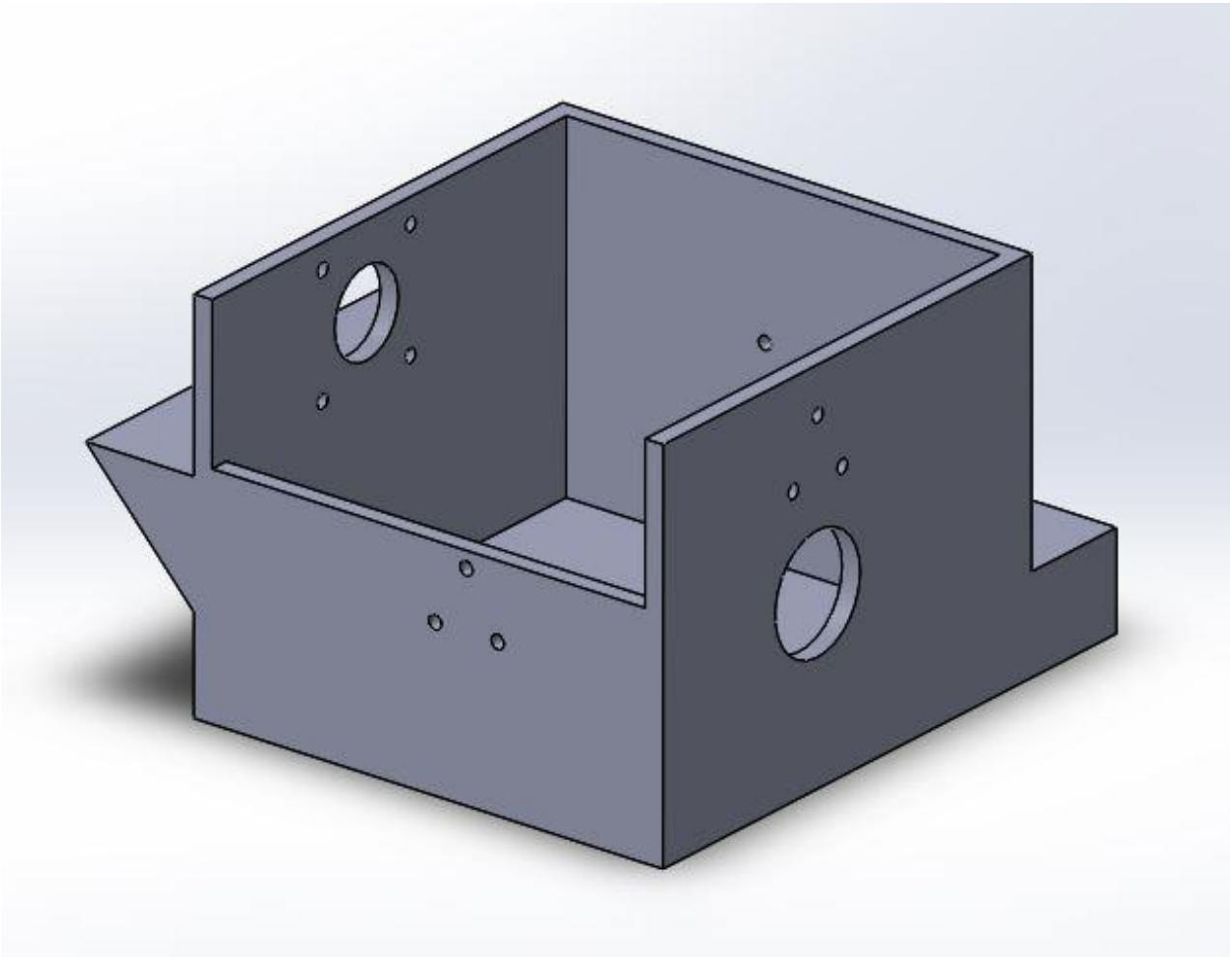

Figura 4.2 – Struttura secondare di supporto per i motori, vista A

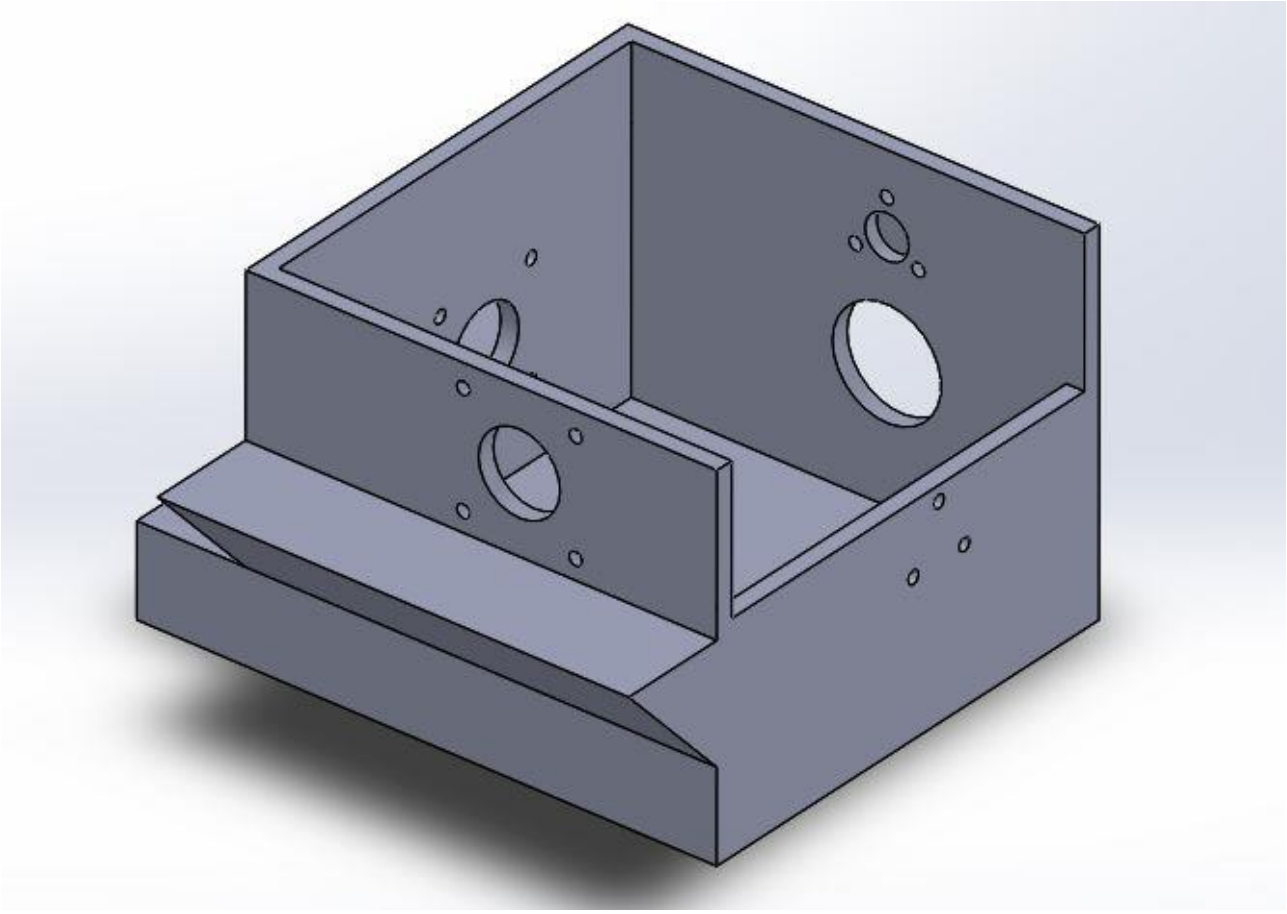

Figura 4.3 – Struttura secondare di supporto per i motori, vista B

Il modello CAD in Figura 4.3 ed in Figura 4.4 è quello che si può considerare definitivo. Nelle fasi successive si ripercorrerà lo stesso processo di produzione già descritto nei capitoli precedenti, sino ad ottenere una struttura di sostegno realizzata in PLA.

4.2 Montaggio

Con questa struttura si complica anche leggermente il montaggio rispetto al caso precedente in quanto sono presenti, questa volta, anche i cuscinetti.

1. Nuovamente vengono incollati i due specchi ad i relativi supporti, cercando di posizionarli, per quanto possibile, entrambi alla stessa distanza rispetto all'estremità del pezzo.
2. I cuscinetti vengono fissati alla carcassa negli opportuni alloggiamenti per incastro. In fase di progetto si deve considerare il diametro del foro realizzato sulla struttura di sostegno leggermente più grande, dato che in lavorazione va a restringersi.

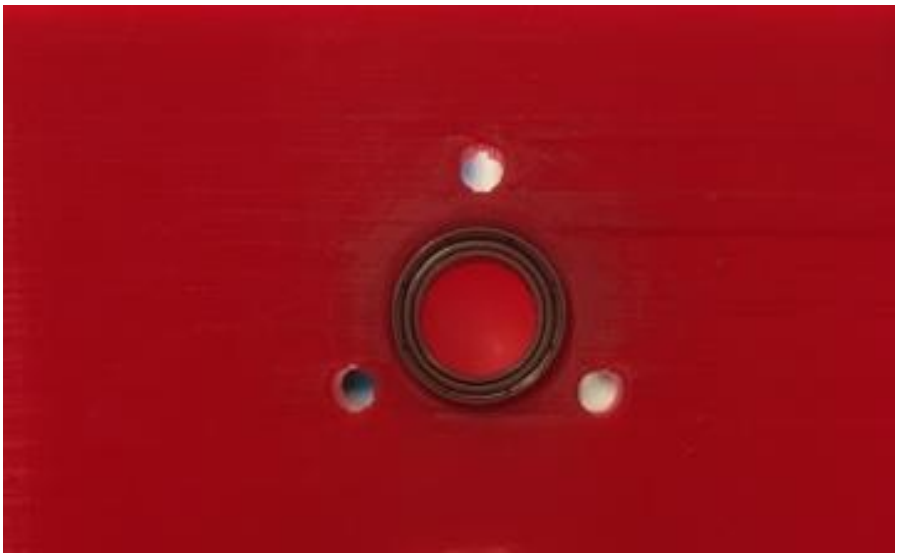

Figura 4.4 – Cuscinetti fissati nella propria sede all'interno della carcassa

3. Sono stati nel frattempo realizzati dei tappi in PLA che servono a evitare qualsiasi possibile movimento assiale dei cuscinetti, e vengono fissati con viti e bulloni alle due parti della carcassa di sostegno dei motori.

Figura 4.5 – Fissaggio dei coperchi alla carcassa

4. L'albero di ciascuno dei due supporti per gli specchi è inserito all'interno del foro del cuscinetto, e vi si manterrà incastrato grazie all'attrito. È bene considerare che in fase di fabbricazione gli elementi realizzati in PLA tendono a ingrandirsi e dunque, tenendo conto di questa tolleranza, il diametro dell'alberino del supporto per lo specchio va realizzato leggermente più piccolo, per evitare che risulti poi eccessivamente grande, impedendo l'accoppiamento con il cuscinetto.
5. I coupling vengono semplicemente inseriti all'interno degli alberini dei due motori stepper senza però essere bloccati, ed i motori vengono fissati alla carcassa sempre utilizzando viti e bulloni.

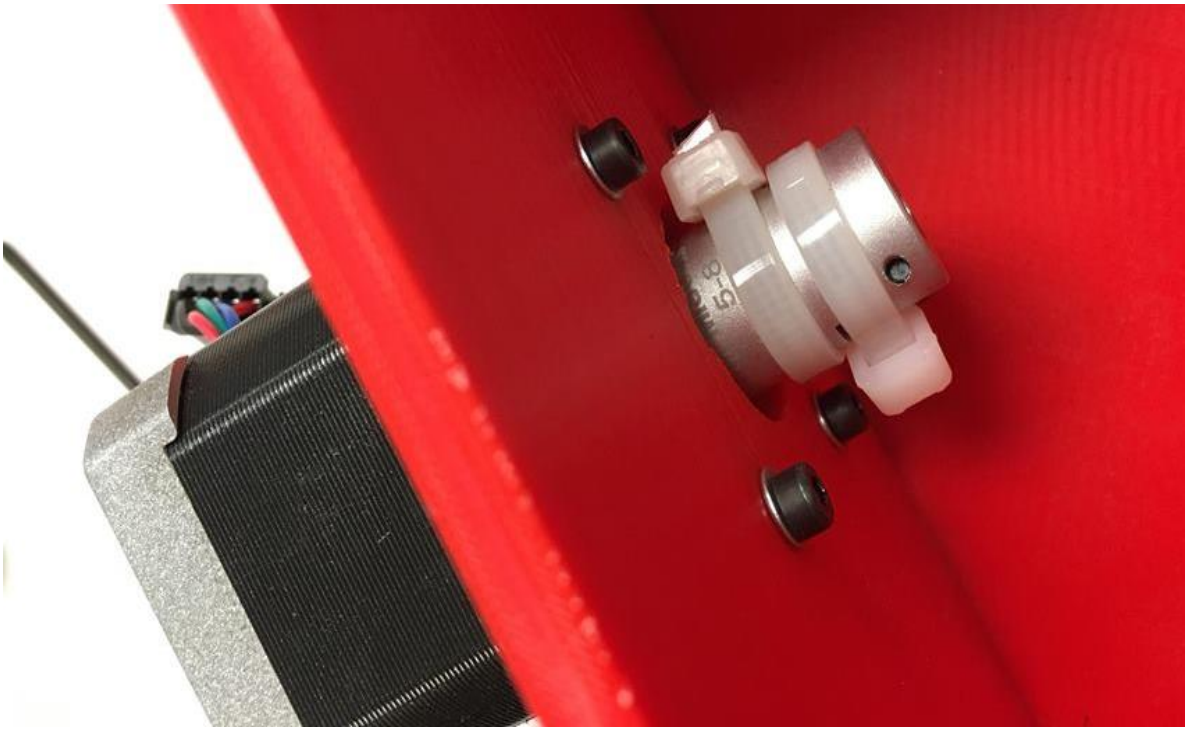

Figura 4.6 – Fissaggio dei motori alla carcassa e posizionamento del coupling

6. Il coupling viene fatto scorrere all'esterno della parte cilindrica di ciascuno dei due supporti per gli specchi, rimasta libera.
7. Si stringono i dadi dei coupling per fissarli ad entrambe le estremità. In questo caso la posizione a cui viene bloccato il copuling, a differenza del montaggio precedente, non ha particolare rilevanza, in quanto i supporti degli spechi non potranno più scorrere orizzontalmente e il corretto posizionamento degli specchi verrà dato nella prima fase, cioè quando vengono fissati ciascuno al proprio supporto.

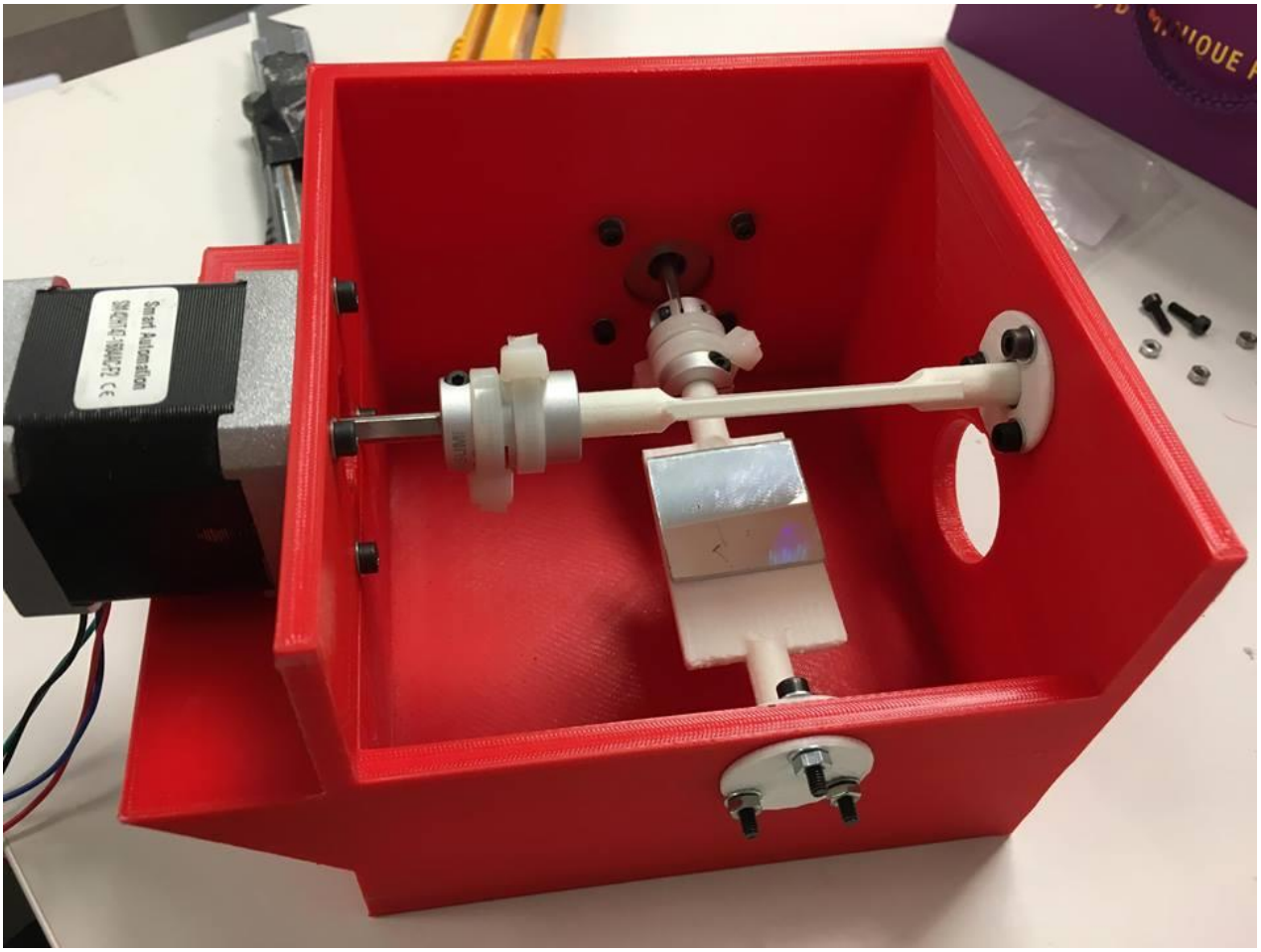

Figura 4.7 – Montaggio completo della struttura secondaria

La *Figura 4.7* rappresenta il montaggio ultimato dei vari pezzi, in cui gli specchi sono allineati tra loro e gli assi di rotazione sono perfettamente orizzontali e perpendicolari.

Avendo separato i due pezzi dunque non sarà necessario effettuare alcuna modifica per quanto riguarda la parte di supporto laser, in quanto l'altezza del primo specchio risulta invariata rispetto al progetto inziale.

Per quanto riguarda invece lo smontaggio del pezzo non c'è alcuna complessità particolare, inoltre consente di recuperare tutti gli elementi utilizzati, compresi i cuscinetti che, con un piccolo sforzo, possono essere rimossi dalla carcassa senza che essi siano danneggiati.

4.3 Prove

Per poter effettuare un confronto credibile tra le due strutture si è pensato di riproporre nuovamente la geometria quadrata. Sebbene essa sia una geometria molto semplice da riprodurre consente facilmente di individuare quali sono i problemi e soprattutto di capire dove siano situati.

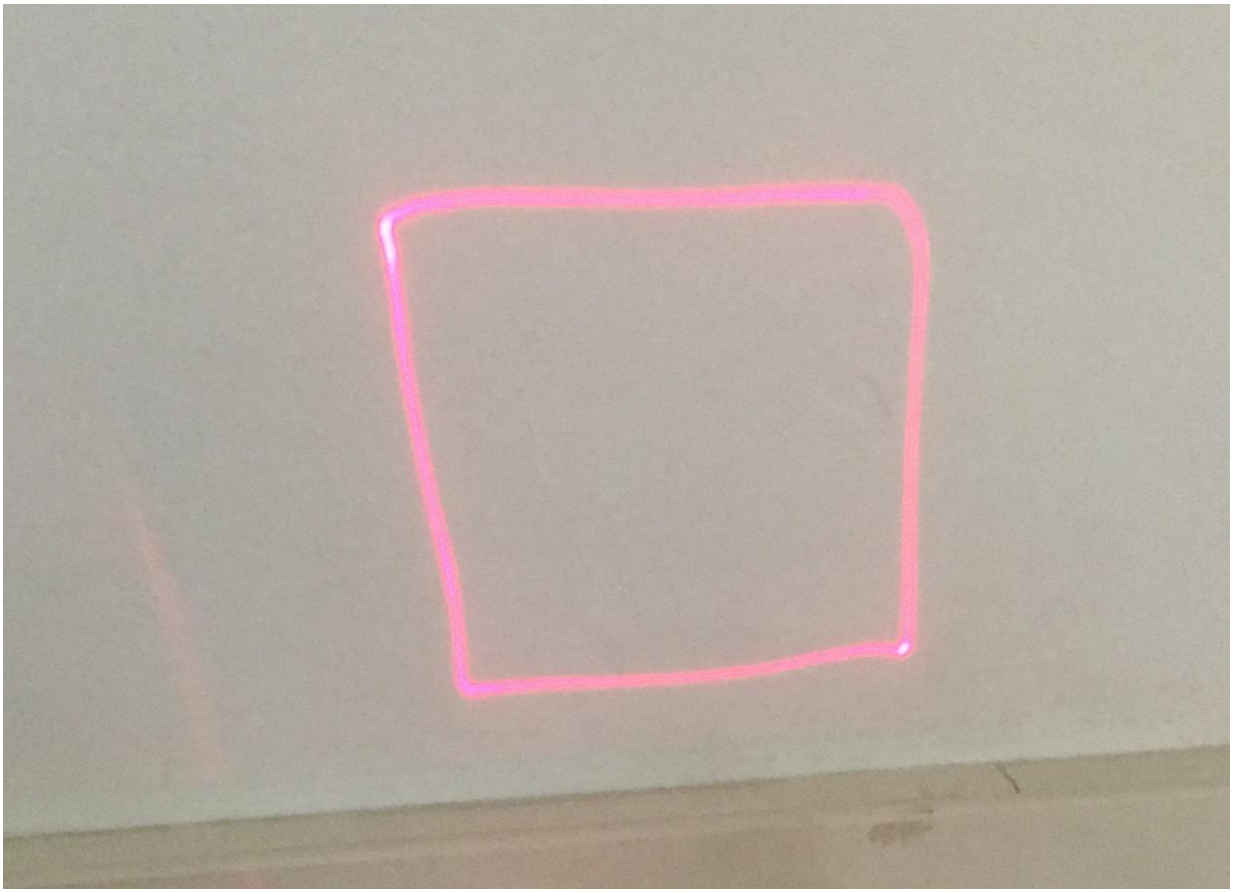

Figura 4.8 – Proiezione del quadrato

Come si può apprezzare dalla *Figura 4.8* le linee rispetto al caso precedentemente descritto sono molto più dritte e ciò è il risultato ottenuto in seguito alle modifiche strutturali realizzate, come ricordiamo con l'obiettivo di ridurre al massimo le vibrazioni.

4.4 Problematiche e possibili ulteriori miglioramenti

Nonostante gli ottimi risultati ottenuti in seguito ad ulteriori numerose prove effettuate si sono riscontrati tuttavia ancora due errori principali:

1. In primis, come d'altronde si può già facilmente vedere dalla *Figura 4.7*, in particolare in alto a sinistra sono ancora presenti delle oscillazioni orizzontali dovute al fatto che i coupling a disposizione non sono rigidi e dunque, a velocità elevate, essi tendono a trasmettere delle vibrazioni agli specchi, e ciò fa sì che si generi una certa distorsione dell'immagine. Per risolvere questo inconveniente si è provato ad irrigidire il coupling stesso utilizzando delle fascette metalliche che vanno a limitarne i movimenti.
2. Il secondo problema è stato riscontrato nella proiezione di geometrie curve, nel cui caso l'approssimazione delle linee curve risulta essere ancora migliorabile; infatti se la curvatura è eccessiva si rischia di vedere tratti rettilinei e non più curve. Ciò è dovuto, come già accennato nei capitoli precedenti, ad un malfunzionamento del microstepping probabilmente dettato da un accoppiamento incompatibile tra motori stepper Nema 17 e driver drv8825. Il problema è facilmente risolvibile sostituendo i motori con altri aventi caratteristiche migliori in grado di controllare 1/32 di passo, e questo vuol dire che la minima rotazione che il motore può effettuare è di 360/6400°, ossia 0.098°. Avremmo così una risoluzione molto migliore e ciascun tratto rettilineo che andrebbe ad approssimare la curva sarebbe talmente piccolo da essere confuso con la curva stessa.
3. In ultimo, mediante l'appoggio di ingegneri specializzati, sarebbe possibile sicuramente ottimizzare il software di gestione dei motori. Commissionando un programma che si adatti meglio alle caratteristiche sia dei motori passo passo che del dirver attraverso cui Arduino comunica.

5. Conclusioni

La produzione additiva si è mostrata particolarmente adeguata per questo genere di progetto in quanto è stato possibile sfruttare la sua immediatezza. La forma e le dimensioni dei vari componenti, infatti, sono state modificate più volte, come ad esempio nel caso del supporto costruito per il laser. Dal momento che non è semplice misurare in maniera corretta le dimensioni del laser, comprensibilmente la prima stampa effettuata è risultata non idonea, in quanto, una volta montato, esso risultava mal posizionato rispetto agli specchi, ed il perfetto allineamento, seppur difficile da ottenere, è una condizione indispensabile per il corretto funzionamento dell'intero sistema. Di conseguenza, individuate le variazioni da effettuare, si è corretto il modello CAD già esistente, si è ottenuto il file g-code, successivamente caricato sulla stampante, e il nuovo pezzo, cioè quello definitivo, è stato ottenuto in brevissimo tempo. Tutto questo con le tecnologie di produzione tradizionali non sarebbe stato possibile; i tempi di attesa del prototipo sarebbero stati sicuramente maggiori con costi anch'essi più elevati, e dunque si sarebbe ridotta di molto la possibilità di effettuare variazioni in fase di progetto.

Per quanto riguarda invece il proiettore laser vero e proprio, è possibile affermare che i risultati riscontrati sono promettenti. Le incongruenze del modello reale rispetto a quello teorico, a cui si desiderava arrivare, non sono eccessive e soprattutto sono risolvibili effettuando dei semplici cambiamenti. Come riportato nel paragrafo 4.4, la maggior parte dei difetti non dipende dalla struttura meccanica, che dunque, in seguito alle modifiche effettuate nel quarto capitolo, risulta essere ottimale per questo progetto, ma dipende essenzialmente dai componenti elettronici come motori e driver, e dalla parte software, che come detto è ampiamente migliorabile.

6. Appendice

In seguito sono riportati alcuni esempi di codici utilizzati per testare il corretto funzionamento del sistema di proiezione laser.

RETTA

```
//Definizione dei PIN
const int pinDir1 = 2;
const int pinStep1 = 3;
const int pinDir2 = 4;
const int pinStep2 = 5;

const long velocita1 = 1500; //Si tratta di microsecondi tra un impulso e l'altro sul pin STEP
const long velocita2 = 1500;

void setup() {
  //inizializzo i PIN come OUTPUT
  pinMode(pinStep1, OUTPUT);
  pinMode(pinDir1, OUTPUT);
  pinMode(pinStep2, OUTPUT);
  pinMode(pinDir2, OUTPUT);
}
void loop() {

  //definiamo la direzione del motore
  digitalWrite(pinDir1, HIGH);
  digitalWrite(pinDir2, HIGH);

  //esegue un giro completo in un senso
  for (int x = 0; x < 30; x++) {
```

```
  digitalWrite(pinStep1, HIGH);
  delayMicroseconds(velocita1);
  digitalWrite(pinStep1, LOW);
  delayMicroseconds(velocita1);

  digitalWrite(pinStep2, HIGH);
  delayMicroseconds(velocita2);
  digitalWrite(pinStep2, LOW);
  delayMicroseconds(velocita2);


}
  delay(1000);

  for (int x = 30; x < 70; x++) {
  digitalWrite(pinStep1, HIGH);
  delayMicroseconds(velocita1);
  digitalWrite(pinStep1, LOW);
  delayMicroseconds(velocita1);

  digitalWrite(pinStep2, HIGH);
  delayMicroseconds(velocita2);
  digitalWrite(pinStep2, LOW);
  delayMicroseconds(velocita2);

}

//aspetto 2 secondi
delay(500);

//cambio la direzione di marcia
digitalWrite(pinDir1, LOW);
digitalWrite(pinDir2, LOW);
```

```
  //rieseguo un altro giro completo nel senso opposto
  for (int x = 0; x < 40; x++) {
    digitalWrite(pinStep1, HIGH);
    delayMicroseconds(velocita1);
    digitalWrite(pinStep1, LOW);
    delayMicroseconds(velocita1);

    digitalWrite(pinStep2, HIGH);
    delayMicroseconds(velocita2);
    digitalWrite(pinStep2, LOW);
    delayMicroseconds(velocita2);
  }
    delay(1000);

    for (int x = 40; x < 70; x++) {
    digitalWrite(pinStep1, HIGH);
    delayMicroseconds(velocita1);
    digitalWrite(pinStep1, LOW);
    delayMicroseconds(velocita1);

    digitalWrite(pinStep2, HIGH);
    delayMicroseconds(velocita2);
    digitalWrite(pinStep2, LOW);
    delayMicroseconds(velocita2);
  }

  //aspetto 2 secondi
  delay(500);
}
```

ROMBO

```
//Definizione dei PIN
```

```
const int pinDir1 = 2;
const int pinStep1 = 3;
const int pinDir2 = 4;
const int pinStep2 = 5;

const long velocita1 = 800; //Si tratta di microsecondi tra un impulso e l'altro sul pin STEP
const long velocita2 = 3*velocita1;

void setup() {
  //inizializzo i PIN come OUTPUT
  pinMode(pinStep1, OUTPUT);
  pinMode(pinDir1, OUTPUT);
  pinMode(pinStep2, OUTPUT);
  pinMode(pinDir2, OUTPUT);
}
void loop() {



  digitalWrite(pinDir1, HIGH);
  digitalWrite(pinDir2, HIGH);



  for (int x = 0; x < 8; x++) {
    digitalWrite(pinStep1, HIGH);
    delayMicroseconds(velocita1);
    digitalWrite(pinStep1, LOW);
    delayMicroseconds(velocita1);

    digitalWrite(pinStep2, HIGH);
    delayMicroseconds(velocita2);
    digitalWrite(pinStep2, LOW);
    delayMicroseconds(velocita2);

  }
```

```
delay(500);

  digitalWrite(pinDir1, HIGH);
  digitalWrite(pinDir2, LOW);

  for (int x = 0; x < 8; x++) {
  digitalWrite(pinStep1, HIGH);
  delayMicroseconds(velocita1);
  digitalWrite(pinStep1, LOW);
  delayMicroseconds(velocita1);

  digitalWrite(pinStep2, HIGH);
  delayMicroseconds(velocita2);
  digitalWrite(pinStep2, LOW);
  delayMicroseconds(velocita2);

}

delay(500);

  digitalWrite(pinDir1, LOW);
  digitalWrite(pinDir2, LOW);

for (int x = 0; x < 8; x++) {
  digitalWrite(pinStep1, HIGH);
  delayMicroseconds(velocita1);
  digitalWrite(pinStep1, LOW);
  delayMicroseconds(velocita1);

  digitalWrite(pinStep2, HIGH);
  delayMicroseconds(velocita2);
  digitalWrite(pinStep2, LOW);
  delayMicroseconds(velocita2);
```

```
  }

  delay(500);

    digitalWrite(pinDir1, LOW);
    digitalWrite(pinDir2, HIGH);

    for (int x = 0; x < 8; x++) {
    digitalWrite(pinStep1, HIGH);
    delayMicroseconds(velocita1);
    digitalWrite(pinStep1, LOW);
    delayMicroseconds(velocita1);

    digitalWrite(pinStep2, HIGH);
    delayMicroseconds(velocita2);
    digitalWrite(pinStep2, LOW);
    delayMicroseconds(velocita2);
  }

  delay(2000);
}
```

QUADRATO

```
const int pinDir1 = 2;
const int pinStep1 = 3;
const int pinDir2 = 8;
const int pinStep2 = 9;

const long velocita1 = 500;
const long velocita2 = velocita1;

void setup() {
```

```
  pinMode(pinStep1, OUTPUT);
  pinMode(pinDir1, OUTPUT);
  pinMode(pinStep2, OUTPUT);
  pinMode(pinDir2, OUTPUT);
}
void loop() {


  digitalWrite(pinDir1, HIGH);
  digitalWrite(pinDir2, HIGH);


  for (int x = 0; x < 15*8; x++) {
    digitalWrite(pinStep1, HIGH);
    delayMicroseconds(velocita1);
    digitalWrite(pinStep1, LOW);
    delayMicroseconds(velocita1);

    }
      //delay(500);

  for (int x = 0; x < 15*8; x++) {
    digitalWrite(pinStep2, HIGH);
    delayMicroseconds(velocita2);
    digitalWrite(pinStep2, LOW);
    delayMicroseconds(velocita2);

  }

  //delay(500);

    digitalWrite(pinDir1, LOW);
    digitalWrite(pinDir2, LOW);
```

```
    for (int x = 0; x < 15*8; x++) {
    digitalWrite(pinStep1, HIGH);
    delayMicrosecon
ds(velocita1);
    digitalWrite(pinStep1, LOW);
    delayMicroseconds(velocita1);
     }
  //delay(500);
for (int x = 0; x < 15*8; x++) {
    digitalWrite(pinStep2, HIGH);
    delayMicroseconds(velocita2);
    digitalWrite(pinStep2, LOW);
    delayMicroseconds(velocita2);

  }

  //delay(2000);
}
```

7. Bibliografia

1. THE ADDITIVE MANUFACTURING PROCESS, Ben Redwood, (https://www.3dhubs.com/knowledge-base/additive-manufacturing-process)
2. ADDITIVE MANUFATURING TECHNOLOGIES: AN OVERVIEW, Ben Redwood, (https://www.3dhubs.com/knowledge-base/additive-manufacturing-technologies-overview)
3. THE ADVANTAGES OF 3D PRINTING, Ben Redwood, (https://www.3dhubs.com/knowledge-base/advantages-3d-printing)
4. ADDITIVE MANUFACTURING OF CERAMICS, (http://www.cttc.fr/en/expertises-en/additive-manufacturing-of-ceramics/)
5. SELECTIVE LASER SINTERING, (http://www.custompartnet.com/wu/selective-laser-sintering)
6. LASER ENGINEERED NET SHAPING, (https://it.wikipedia.org/wiki/Laser_engineered_net_shaping)
7. DRV8825 STEPPER MOTOR DRIVER CARRIER, HIGH CURRENT (MS20A), (https://www.pololu.com/product/2132)