

A detailed technical line drawing of a 3D printer's internal mechanism, showing the print head, extruder, and various structural components. The drawing is rendered in a light gray color, serving as a background for the text.

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

**PROGETTAZIONE DI UN SISTEMA DI RIEMPIMENTO
AUTOMATICO PER MIGLIORARE LA QUALITÀ DI STAMPA E
RIDURRE IL CONSUMO DI RESINA NELLE STAMPANTI DESKTOP**

Laurea Magistrale in
ADVANCED DESIGN dei PRODOTTI
A.A. 2022/23 | Sessione III

Dipartimento di
ARCHITETTURA

Relatore
Ing. Mattia Mele

Candidato | Matricola
Federico Pietro Colleoni
0001060378

Correlatori
Prof. Dario Crocco
Ing. Gregorio Pisaneschi

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

**PROGETTAZIONE DI UN SISTEMA DI RIEMPIMENTO
AUTOMATICO PER MIGLIORARE LA QUALITÀ DI STAMPA E
RIDURRE IL CONSUMO DI RESINA NELLE STAMPANTI DESKTOP**

Laurea Magistrale in
ADVANCED DESIGN dei PRODOTTI
A.A. 2022/23 | Sessione III

Dipartimento di
ARCHITETTURA

Relatore
Ing. Mattia Mele

Candidato | Matricola
Federico Pietro Colleoni
0001060378

Correlatori
Prof. Dario Croccolo
Ing. Gregorio Pisaneschi

Abstract

Le tecnologie additive *Mask Projection Vat Photopolymerization* (MPVPP) sono note per la loro alta risoluzione e velocità di stampa: non sono esenti però da criticità e limiti. Una di queste criticità riguarda lo stato turbato della resina fotopolimerica e di come questo influenza la qualità di stampa finale. In questo elaborato viene ipotizzato un sistema per limitare l'effetto. In particolare si evidenzia il percorso progettuale che è terminato con la prototipazione delle componenti e la prova di queste per validare la proposta. La soluzione proposta è rivolta e si adatta a tutte le stampanti desktop di media e grande taglia che impiegano la tecnologia LCD.

L'elaborato si divide principalmente in tre parti: la prima è relativa alla contestualizzazione della tecnologia additiva al giorno d'oggi e di come essa funzioni; la seconda parte descrive i passaggi che hanno caratterizzato il percorso progettuale; la terza parte raccoglie le osservazioni fatte durante le prove e le relative conclusioni.

Indice

1	Industria 4.0, Additive Manufacturing e FabLab	1
1.1	Industria 4.0	2
1.2	Additive Manufacturing	4
1.2.1	Sviluppo della tecnologia additiva	6
1.2.2	Design for Additive Manufacturing	8
1.3	FabLab	10
2	Vat Photopolymerization	13
2.1	Materiali per VPP	16
2.2	Strumenti per la progettazione 3D	18
2.3	Progettare per VPP	19
3	Mask Projection VPP	23
3.1	Il processo di stampa 3D LCD	26
3.2	La ricerca scientifica su MPVPP	28
3.3	Stato dell'arte	30
3.3.1	Tabella comparativa	33
4	Obiettivi dell'elaborato	35
4.1	Metodi e strumenti applicati	36

5	Percorso progettuale e modellazione	41
5.1	Regolazione del flusso	41
5.2	Componenti	44
5.3	Sistemi di chiusura	46
5.3.1	Valvola con testa conica	46
5.3.2	Valvola con testa a calotta	47
5.3.3	Valvola ad incastro	49
5.3.4	Valvola con guarnizione	50
5.4	Vaschetta	51
5.5	Sistema di aggancio	54
6	Prototipazione	55
6.1	Tavole tecniche	57
6.2	Prototipi	67
7	Risultati	69
8	Discussione	73
9	Conclusioni	77
	Bibliografia e Sitografia	81

1 Industria 4.0, Additive Manufacturing e FabLab

A seguito delle restrizioni imposte dalla pandemia di COVID-19, per promuovere la ripresa economica del paese, è stato presentato all'Unione Europea il Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR) in risposta alle linee guida stabilite dall'UE. Il Piano è un programma di investimenti a lungo termine varato dal governo italiano nel quale si evidenzia quali sono e saranno i provvedimenti e le scelte volte a sostenere la ripresa economica, la modernizzazione e la resilienza del sistema economico italiano.

Nel contesto del PNRR, l'Industria 4.0 rappresenta un importante obiettivo, poiché mira a potenziare la competitività delle imprese italiane attraverso la digitalizzazione e l'adozione di tecnologie avanzate. Alcuni degli obiettivi principali dell'Industria 4.0 includono:

- digitalizzazione: promuovere l'adozione di tecnologie digitali per ottimizzare i processi produttivi, migliorare l'efficienza operativa e ridurre i costi.
- automazione avanzata: implementare sistemi di produzione automatizzati e robotici per aumentare la produttività e la qualità dei prodotti.
- innovazione e ricerca: sostenere l'innovazione attraverso investimenti in ricerca e sviluppo, incoraggiando le imprese a sviluppare soluzioni avanzate e nuovi prodotti.
- formazione e competenze: promuovere la formazione e lo sviluppo delle competenze necessarie per sfruttare appieno le opportunità offerte dall'Industria 4.0.

- sostenibilità: integrare soluzioni di sostenibilità ambientale nei processi produttivi, contribuendo così a ridurre l'impatto ambientale delle attività industriali.

1.1 Industria 4.0

L'Industria 4.0 è una strategia di sviluppo industriale che mira a sfruttare le tecnologie digitali e l'automazione avanzata per trasformare e migliorare il settore manifatturiero. Questa strategia prende il nome dalla "quarta rivoluzione industriale", caratterizzata dalla convergenza di tecnologie avanzate come l'*Internet of Things* (IoT), l'intelligenza artificiale, la robotica avanzata, la stampa 3D e la realtà virtuale, che stanno cambiando in modo significativo la produzione e la gestione delle aziende. Attualmente viene posta maggiore attenzione ai desideri e alla personalizzazione degli utenti nei confronti dei prodotti realizzati. Ciò è dovuto alla grande varietà di domanda ed è

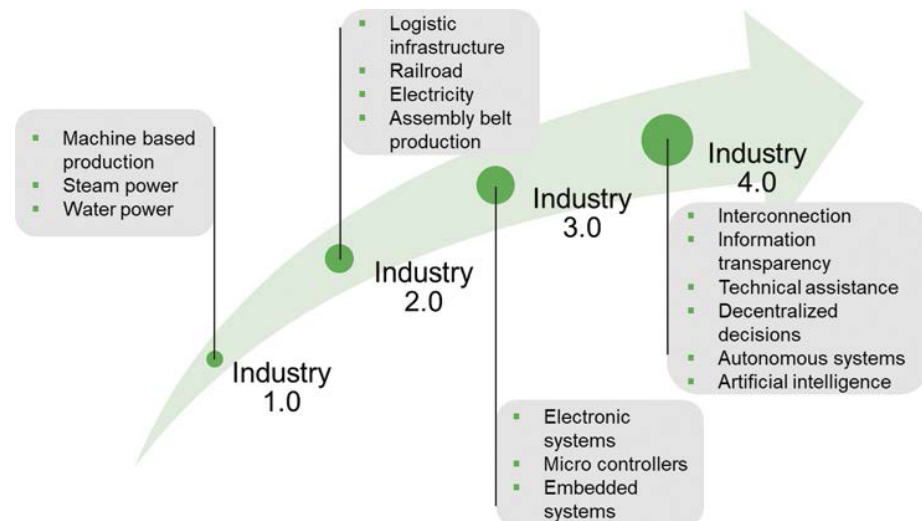


Figura 1.1: principali caratteristiche di ogni rivoluzione industriale. (Hopmann & Schmitz, 2021)

divenuto fondamentale adattare il criterio dei processi produttivi, così come le tecnologie, in relazione ai bisogni dell'utente. L'industria 4.0 è la manifestazione di questo pensiero e lo fa' tramite l'impiego di una nuova organizzazione e controllo della catena industriale lungo l'intero processo produttivo. L'uso di sensori, dati e informazioni scambiate tra macchina-macchina e uomo-macchina permettono di raggiungere qualità, efficienza ed ampliare le possibilità produttive. In questo scenario l'impiego dell'*Additive Manufacturing* (AM), lo sviluppo della *digital culture* e la nascita dei *digital fabrication laboratory* (FabLab), avvenuta il decennio scorso, hanno permesso di sbloccare la produzione di oggetti anche per chi si trova alla fine del percorso produttivo: il *consumer*.

La quarta rivoluzione industriale ha avuto inizio nel 2011, quando il governo tedesco promosse l'iniziativa di una cooperazione tra industria e l'organizzazione scientifica: il nome era "*Industry 4.0*". Nello stesso anno, gli USA avviarono il piano "*Advanced Manufacturing Partnership*" affinché si innovasse il sistema manifatturiero, incrementando la produttività e riducendo i costi. Successivamente nel 2015 in Francia venne lanciato il programma "*Alliance for the Future*", per implementare il processo di digitalizzazione a supporto dell'innovazione, ed in Italia fu approvato il piano chiamato "Industria 4.0".

Questa nuova visione di industria è caratterizzata da una forte digitalizzazione della produzione industriale al fine di ottenere incrementi in termini di qualità, efficienza, robustezza e flessibilità. Per ottenere ciò sono state usate moderne infrastrutture dell'informazione e tecniche di comunicazione con l'obiettivo di creare una intelligente organizzazione del sistema produttivo: non solo nei confronti delle singole macchine

di produzione, ma anche nell'interazione tra uomo, macchina, sistema di produzione, logistica e prodotti. Secondo C. Hopmann e M. Schmitz (2021), i principali principi di progettazione sono definiti come:

- interconnessione: persone, macchine, dispositivi e sensori sono connessi e comunicano tra loro.
- informazione trasparente: i dati, ottenuti dall'interconnessione dei dispositivi durante la produzione, sono messi a disposizione lì dove portano valore.
- assistenza tecnica: i moderni sistemi impiegati supportano l'uomo nella fase di scelta delle informazioni processate rilevando quali siano compromettenti o comunque non sicure.
- decisioni decentralizzate: i sistemi sono abilitati all'esecuzione degli obiettivi in completa autonomia e richiedono assistenza solo nel caso in cui vi siano conflitti nel raggiungere tale obiettivo.

L'industria 4.0 mira ad attivare la *smartification* dei sistemi produttivi attraverso la digitalizzazione e una maggiore introduzione della tecnologia dell'informazione nella produzione tradizionale. I dati acquistano ancora più valore dell'era digitale ed il loro ottenimento tramite tecnologie, come sensori, è divenuto uno dei focus principali per l'attuale sviluppo di processi automatici e la loro digitalizzazione. Così come l'intera

catena di produzione, anche i prodotti ottenuti da questa nuova forma di industria saranno capaci di raccogliere dati in modo da poter condividere le informazioni ed eventualmente elaborarle. Questi oggetti vengono definiti *smart*.

1.2 Additive Manufacturing

Additive Manufacturing è il termine formale per ciò che viene chiamata “Prototipazione Rapida” o “Stampa 3D”. Si intende un processo rapido per la creazione di sistemi o parti prima del loro rilascio e/o commercializzazione. L’enfasi viene messa appunto sulla rapidità con cui è possibile ottenere componenti al fine di avere un riscontro diretto con la realtà, senza andare a scomodare l’industria per ciò che potrebbe non essere definitivo. Il principio base di questa tecnologia è il modello, ottenuto inizialmente tramite un software tridimensionale *Computer Aided Design* (CAD), che può essere fabbricato direttamente senza la necessità di organizzare il processo. È possibile ottenere oggetti 3D complessi, al contrario della manifattura classica, dove è necessario determinare quali processi sono necessari, il loro ordine e l’analisi dettagliata della geometria per capire quali processi aggiuntivi sono da considerare per la finitura. L’AM richiede solo i dettagli dimensionali e una sufficiente comprensione di come queste macchine funzionano e il materiale che si utilizza. La chiave per capire come questa tipologia di manifattura funzioni sta nella realizzazione delle parti ottenute tramite l’addizione di materiale per *layer*, o strati. Ogni *layer* rappresenta la sezione sottile derivata dall’originale file CAD. Il risultato, derivato dalla somma di tutti questi strati, è una approssimazione della forma originale (Fig. 1.2): più un *layer* è sottile, più il risultato sarà vicino all’originale.



Figura 1.2: immagine CAD di una tazza da tè (sopra). Immagini che mostrano gli effetti della costruzione utilizzando diversi spessori dei layer (in basso). (Gibson et al., 2021)

Inizialmente l’AM era utilizzata specificatamente per creare modelli e così avere un confronto nella realtà del prodotto così realizzato. Il prototipo ottenuto aiutava ad apprezzare le forme e i fini in generale del design. Migliorando la precisione e le proprietà dei materiali usati dalle macchine AM, si è potuto ottenere componenti che erano capaci di avere le tolleranze richieste per l’assemblaggio e di poter passare alla messa in opera.

La radice dei processi AM è condivisa con quella della manifattura convenzionale: le macchine a Controllo Numerico Computerizzato (CNC). I processi convenzionali vengono

generalmente suddivisi in sottrattivi, colatura e formatura. Tutte le tipologie sfruttano le CNC per incrementare l'accuratezza e avere maggior controllo sul processo. Nella tipologia sottrattiva il materiale viene lavorato tramite utensili di taglio per rimuovere del materiale e ottenere il pezzo desiderato. Nella colatura, il materiale fuso viene colato nello stampo. Nella formatura, invece, gli utensili deformano le lamiere o blocchi di materiale applicando forze. Le CNC sono in grado di ottenere il componente a partire da un blocco che è almeno grande quanto la parte da realizzare. Nei processi additivi i materiali di partenza vengono messi insieme per creare prodotti che sono più grandi in una o più dimensioni.

In generale è possibile considerare 8 passaggi che vengono racchiusi nel processo di AM, attraverso i quali il componente passa dalla sua descrizione CAD virtuale a quella fisica:

1. CAD: tutto inizia dal software di modellazione CAD che può lavorare e quindi generare solidi 3D o superfici. La differenza tra i due è che al primo è spesso collegato il concetto di *parametric design*, mentre al secondo quello di *organic design*.
2. Conversione in ".stl": questo formato di file descrive le superfici esterne chiuse del modello di partenza e fornisce le basi per il calcolo dello *slicing*, ovvero il processo utile alla messa in stampa. Questo formato è lo standard accettato da tutte le macchine della famiglia AM e fornito come output da tutti i software CAD.
3. Trasferimento alla macchina AM e preparazione del file .stl: il file .stl viene inviato al programma della stampante per il controllo dimensionale, posizione e orientamento sul piatto di stampa.
4. Setup della macchina: la stampante viene preparata per affrontare il processo desiderato, andando ad impostare i parametri di energia della sorgente, spessore del *layer*, tempi di stampa, ecc.
5. Produzione: questa fase è gestita dalla stampante stessa in modo automatico e non richiede, in generale, la presenza di un supervisore fino alla fine del processo. È consigliato comunque un controllo di come procede la stampa per evitare errori che possono portare al fallimento del processo.
6. Rimozione: una volta completata la fase precedente il componente può essere rimosso ed è richiesta l'interazione con la macchina, che può avere dei sistemi di sicurezza da dover disabilitare.
7. Post-processi: l'oggetto, a questo punto, potrebbe richiedere delle fasi di pulizia e rimozione supporti affinché si possa utilizzare.
8. Messa in opera: il componente è ora pronto per l'uso e può richiedere che esso venga assemblato insieme ad altre parti per ottenere il prodotto definito.

1.2.1 Sviluppo della tecnologia additiva

Esistono diverse tecnologie additive che fanno parte della grande famiglia dell'AM: ognuna di queste può essere raggruppata in categorie e sottocategorie che identificano la materia prima usata (polimero, metallo, ecc.), il suo stato (polvere, filo, liquida), sorgente impiegata, architettura della macchina, ecc. Le diverse categorizzazioni aiutano a capire quali possano essere i processi migliori per la realizzazione di un prodotto specifico, rispettando i requisiti fisici-chimici, meccanici e di funzionamento dell'oggetto e della macchina. La categorizzazione qui riportata è quella descritta da I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker e M. Khorasani (2021):

- *Vat Photopolymerisation* (VPP): processo che utilizza una resina liquida fotopolimerica, contenuta in una vasca e sottoposta ad un raggio selettivo di energia per polimerizzare l'area corrispondente alla sezione del pezzo.
- *Powder Bed Fusion* (PBF): processo che sfrutta un contenitore riempito di polveri (polimeri o metalli) che vengono processate tramite l'uso di un raggio di energia selettivo, generalmente laser o fascio di elettroni.
- *Material Extrusion* (MEX): processo che deposita del materiale tramite estrusione attraverso un ugello, mentre questo descrive un percorso che rappresenta l'area della sezione del componente.
- *Material Jetting* (MJT): processo che deposita una goccia di materiale in modo selettivo.

- *Binder Jetting* (BJT): processo in cui un liquido legante è depositato su di un letto di polvere in modo da ottenere la sezione della parte.

Per completezza alla categorizzazione delle tipologie di tecnologie AM si aggiungono: la *Sheet Lamination* (SHL), processo che lega più fogli di materiale tra loro per creare l'oggetto; e il *Directed Energy Deposition* (DED), processo che deposita del materiale (normalmente sotto forma di polvere o filo) e simultaneamente gli fornisce energia.

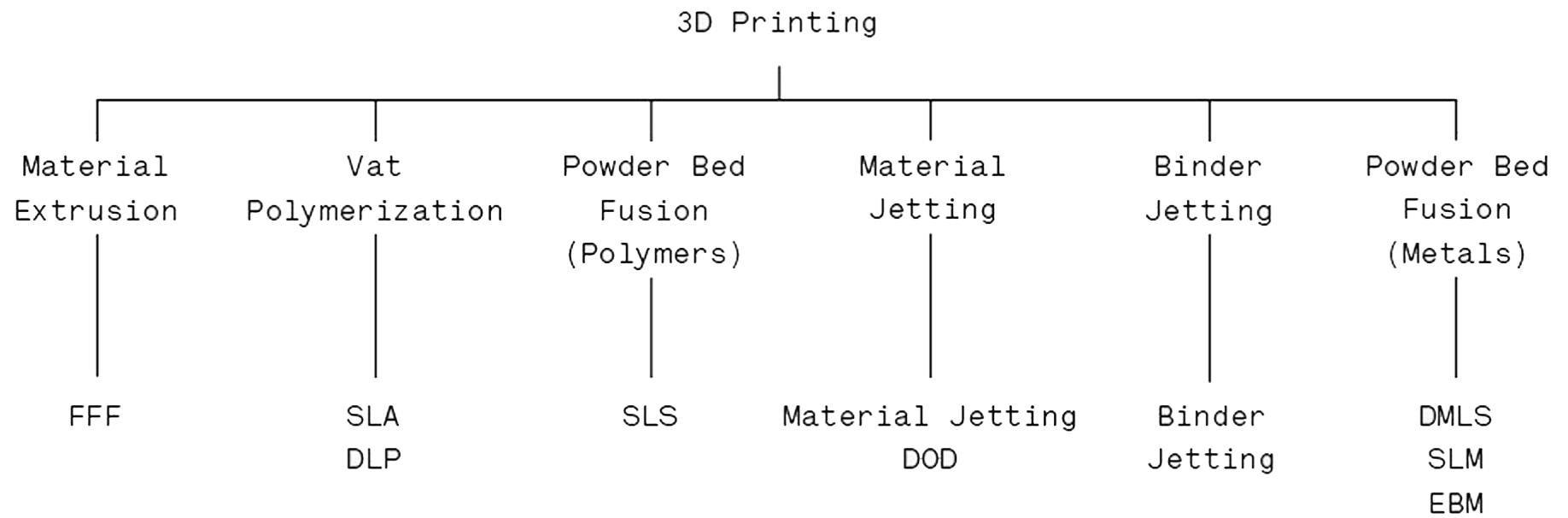


Diagramma ad albero delle stampanti 3D esistenti.
(Redwood et al., 2017)

1.2.2 Design for Additive Manufacturing

I benefici delle tecnologie additive sono molteplici e sbloccano possibilità geometriche, di materiale e di personalizzazione che normalmente non sarebbero ottenibili tramite la convenzionale manifattura. Allo stesso tempo questa tecnologia richiede dei supporti, poiché genera delle proprietà anisotrope nel pezzo e sono, in generale, necessari dei post-processi. Tutti gli aspetti, negativi e positivi, hanno portato ad istruire i progettisti alla corretta progettazione per la manifattura additiva. Nel *Design for Manufacturing* (DfM), progettazione per la manifattura tradizionale, tipicamente si cerca di raggiungere lo scopo cercando di eliminare difficoltà e minimizzare i processi di produzione, assemblaggio e costi logistici. Le capacità delle macchine AM permettono nuove opportunità, che migliorano la produzione, la multifunzionalità e il basso costo della manifattura. Queste includono:

- forme complesse: virtualmente è possibile ottenere qualsiasi forma;
- complessità su scale differenti: la progettazione può arrivare a definire strutture che vanno dalle micro-scale alle meso-scale;
- complessità dei materiali: il processo può interessare un punto o un layer per volta;
- complessità della funzione: i meccanismi e l'assemblaggio può avvenire simultaneamente alla fabbricazione.

In contraddizione al DFM, il *Design for Additive Manufacturing* (DfAM) dovrebbe avere come obiettivo la massimizzazione delle performance del prodotto attraverso la sintesi della forma, dimensioni, complessità strutturale e composizione materiale, soggette alle capacità della tecnologia additiva. Da un lato questa progettazione può portare opportunità e dall'altro restrizioni, come riportate nella Fig. 1.4 sottostante.

Opportunistic design	Restrictive design
Explore the design space enabled by the manufacturing process	Understand process constraints
Identify AM characteristics to leverage (customization, part consolidation)	Determine how to satisfy constraints
Generative design and topology optimization	Design rules (avoid need for support structures)
Function sharing or integration	Feature design suggestions (min. feature size)
Multiple or graded materials	Design to minimize costs

Figura 1.4: tabella delle opportunità e delle restrizioni della progettazione per AM. (Gibson et al., 2021)

Ogni tecnologia additiva genera il componente un *layer* alla volta. Nonostante i numerosi parametri che è possibile impostare, per meglio calibrare la macchina, quello più importante rimane l'altezza dello strato. Infatti la variazione di questo numero influenza non solo la qualità del pezzo così realizzato, ma anche il tempo necessario alla produzione. Strati più sottili permettono di ottenere qualità superficiali migliori, a discapito del tempo di stampa che varia in modo inversamente proporzionale. Così, al contrario, impostare uno strato più spesso permette di guadagnare tempo, ma genera scarse qualità superficiali, tanto da definire i pezzi allo stato "grezzo". Ogni tipologia di processo additivo ha il suo range operativo di altezza *layer* (Fig. 1.5), affinché si garantisca accuratezza e proprietà meccaniche. In generale uno spessore maggiore viene impiegato per realizzare dei prototipi in modo da avere un rapido riscontro nella realtà. Dall'altra parte, usare un *layer* più sottile permette di ottenere un pezzo di finitura e accuratezza elevate (Fig. 1.6).

La tecnologia additiva non è esente da problemi che possono insorgere durante il processo di stampa o dopo la sua realizzazione (anche tempo dopo la conclusione delle fasi di finitura). Questi fenomeni possono avere diverse cause e sono una combinazione di diversi fattori: caratteristiche della materia prima, processo di fabbricazione e proprietà del pezzo. Ogni tecnologia AM ha le proprie limitazioni e difetti, alcuni dei quali sono comuni fra tutte. Questi possono essere: foratura, degradazione chimica e ossidazione, particelle residue, crepe, delaminazione, distorsione, inclusione, porosità, ecc.

Technology	Common layer thickness (microns)
FFF	50 - 400
SLA / DLP	25 - 100
SLS	100
Material Jetting	16 - 30
Binder Jetting	100
DMLS/SLM	50

Figura 1.5: spessori degli strati utilizzati dalle tecnologie AM. (Redwood et al., 2017)

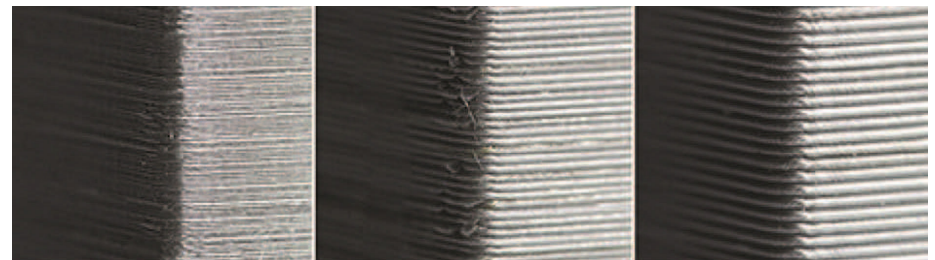


Figura 1.6: dettaglio di oggetti stampati tramite FFF con altezza layer 50 µm (sinistra), 200 µm (centro) e 300 µm (destra) differenti. (Redwood et al., 2017)

1.3 FabLab

Il concetto del *digital fabrication laboratory* è stato concepito dal professore N. Gershenfeld, del MIT, che fondò il primo FabLab nel 2003. L'idea è quella di avere un luogo fisico che possa essere considerato un centro d'innovazione ed integrazione, dove menti creative giungono ed interagiscono tra loro: l'area offre servizi personalizzati grazie alla *digital manufacturing* oltre alla possibilità di poter collaborare da remoto e realizzare progetti in forma digitale. Le attività del laboratorio mirano a risolvere problemi relativi al miglioramento tecnologico e allo sviluppo di progetti in linea con le necessità della società e del mercato. Un FabLab è munito di una vasta gamma di apparecchiature tecnologiche, come le stampanti 3D, macchine CNC e macchine a laser. Questo tipo di produzione non può competere con la produzione di massa odierna, ma ciò non è tra i suoi obiettivi: la promozione delle nuove tecnologie e la facilitazione d'accesso alla manifattura digitale sono il fine dell'associazione. In Italia il censimento ha contato nel 2017 settanta FabLab.

I FabLab sono coinvolti in molti progetti che possono essere promossi da scuole, associazioni ed enti privati, andando così ad interagire con tutti gli attori sul territorio. Anche il privato può accedere al servizio e usufruire delle attività svolte all'interno. I vantaggi, soprattutto dal punto di vista dell'organizzatore e del professionista che ha necessità di realizzare un progetto, sono la rapidità con cui vengono svolti i processi di stampa, la minima generazione di materiale di scarto e il basso costo (rispetto alla realizzazione dello stesso oggetto tramite lavorazioni convenzionali). In questo modo sono moltissime le attività commerciali che hanno instaurato un rapporto con i *fabricator laboratories*: studi di architettura, atelier tessili, studi dentistici, gioiellerie, ecc. Inoltre, l'avanzamento nella produzione e



Foto raffigurante il FabLab ISLAND.
<https://www.fablabs.io/>

riproduzione di queste macchine AM ha permesso di abbassare il costo di queste, così da renderle accessibili anche ai privati. Ciò ha dato il via alla presenza delle stampanti 3D nelle abitazioni delle persone, permettendo di prodursi quello di cui hanno bisogno: il *consumer* diventa un *producer*, ovvero un *prosumer*. Questo attore si è sviluppato anche grazie alla forte comunità digitale che si è generata e consolidata negli anni, dove professionisti e non si confrontano e scambiano idee (molto spesso *open source*) sulla progettazione dei prodotti.

2 Vat Photopolymerization

Le varietà di tecnologie additive permettono di avere una vasta scelta dal punto di vista produttivo. Nonostante ciò vi sono alcune tecnologie che trovano poco impiego all'interno del processo industriale e non (a causa magari della specificità della produzione, del costo, della complessità), e altre che hanno largo utilizzo vista la grande versatilità. Tra queste ultime vi è la categoria delle *Vat Photopolymerization* (VPP), categoria di cui fa parte l'insieme di stampanti per cui è stato realizzato l'elaborato di questa tesi. Di seguito, quindi, affronteremo tutto ciò che riguarda questa tecnologia.

La *photopolymerization*, o fotopolimerizzazione, è un processo che fa uso di un liquido fotopolimerico che reagisce alle radiazioni e diviene solido. Questa tipologia di materiale viene impiegato nella *Vat Photopolymerization*. La prima tecnologia ad essere stata sviluppata fu la stereolitografia (SLA) concepita da Charles Hull durante la metà degli anni '80: un liquido sensibile alle radiazioni viene posto in una vasca ed esposto a ripetitivi pattern provenienti da una sorgente luminosa che descrivono la sezione del corpo che si vuole realizzare. Questi fotopolimeri furono sviluppati alla fine degli anni '60 e principalmente usati nel campo del *coating* e della stampa. Vari tipi di radiazioni possono essere usate per attivare il processo di polimerizzazione di questi liquidi:

- raggi gamma
- raggi UV
- raggi X
- luce visibile (in alcuni casi)
- fasci di elettroni

La maggior parte di questi liquidi sono sensibili alle radiazioni che hanno lunghezza d'onda nel campo degli ultravioletti (300-400nm circa), perciò la maggior parte delle macchine VPP fanno uso di sorgenti luminose quali lampade UV oppure laser. Vi sono due diverse macro-configurazioni sviluppate per questo processo in vasca (Fig. 2.1): le vector scan, o scan vettoriale, (SLA) e la mask projection (MPVPP). Il primo caso è l'approccio tipico delle macchine SLA, mentre il secondo vede l'irradiazione dell'intero layer per volta. Una terza configurazione è quella definita "a due fotoni".

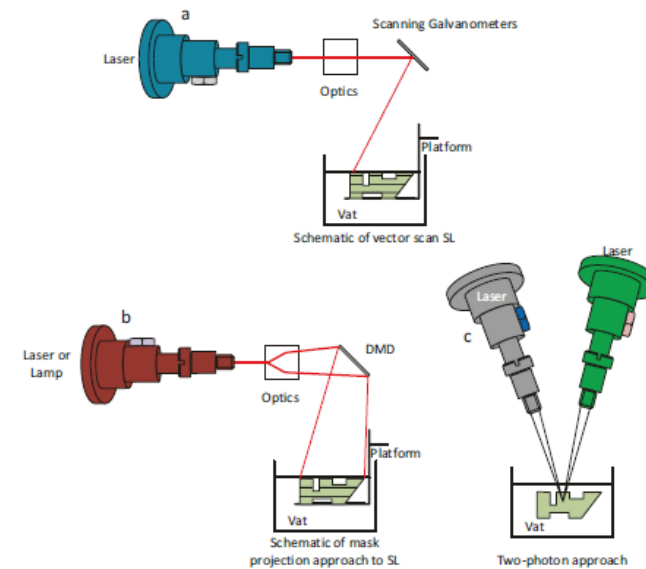


Figura 2.1: diagramma schematico dei tre approcci al processo di fotopolimerizzazione. (Gibson et al., 2021)

Andando più nello specifico, le tecnologie sviluppate che rientrano nella classificazione delle macchine VPP sono:

- Stereolitografia (SLA)
- *Digital Light Processing* (DLP)
- *Digital Light Synthesis* (DLS)
- *Liquid Crystal Display* (LCD 3D printing)

Le resine fotopolimeriche vengono irradiate generalmente con luce UV o laser e i fotoni della radiazione interagiscono con gli elettroni e le molecole dei polimeri. Queste interazioni generano delle reazioni chimiche che iniziano il processo di legame dei monomeri, andando ad incrementare la lunghezza delle catene, peso molecolare, viscosità: avviene così la polimerizzazione. Dal momento che la resina si presenta allo stato liquido, la tecnologia additiva avviene generalmente con il fluido posto in una vasca e dall'alto arriva la radiazione: completato il *layer*, il letto, su cui si è solidificato lo strato, scende di un'altezza pari allo spessore del *layer* e viene ricoperto così di resina liquida per ripetere il passaggio. In alternativa è possibile irradiare la resina da sotto la vasca, caratterizzando questa con un fondo trasparente (normalmente in PTFE o FEP) che permetta il passaggio dei fotoni: il piatto della stampante, immerso nella vasca, invece di scendere, ad ogni strato completato sale e stacca il *layer* appena realizzato dal fondo. La prima variante viene definita "*top-down*" (Fig. 2.1), poiché il verso di movimento del piatto è dall'alto verso il basso e permette di realizzare pezzi più grandi grazie al supporto

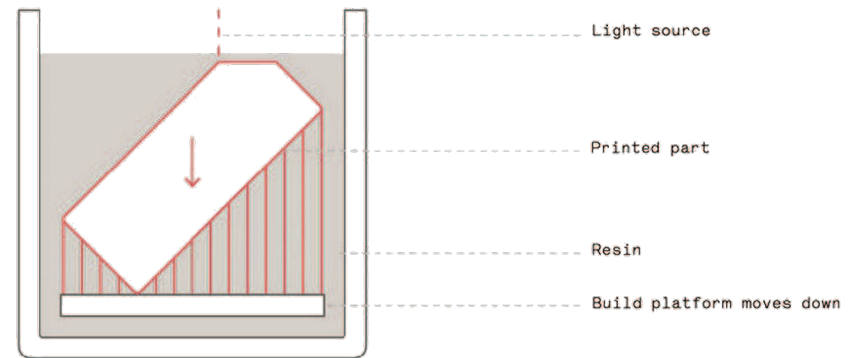


Figura 2.2: schema architettura "*top-down*".
(Redwood et al., 2017)

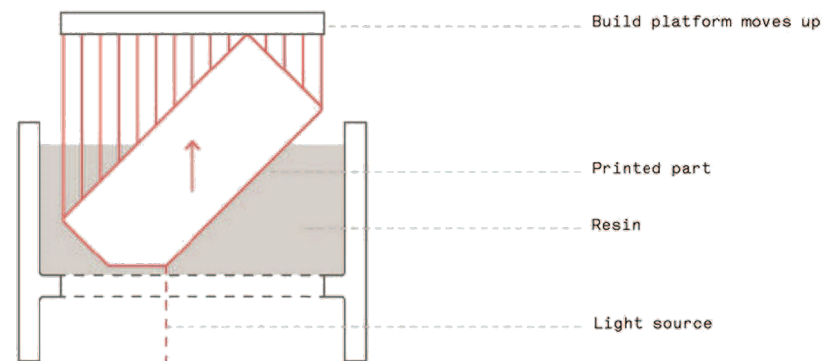


Figura 2.3: schema architettura "*bottom-up*".
(Redwood et al., 2017)

del piatto stesso. La seconda variante invece, ha il movimento del piatto dal basso verso l'alto, perciò è chiamata “*bottom-up*” (Fig. 2.2) e permette di riempire la vasca con il minimo di fluido richiesto, necessario per riempire il *gap* tra il piatto e il fondo, ma non è consigliata la realizzazione di parti grandi.

I vantaggi e gli svantaggi di entrambe le tipologie di architettura sono riportate in Fig. 2.4 e Fig. 2.5.

A differenza della *Fused Filament Fabrication* (FFF), la maggior parte delle stampanti VPP non possono essere smontate e modificate nelle loro parti. Normalmente gli unici input che l'operatore definisce sono l'orientamento e il supporto delle parti, l'altezza del layer, il materiale: tutti questi parametri si concentrano nella fase dello *slicing*. L'altezza dello strato può variare tra i 25 e i 100 micron.

Uno dei problemi più grandi relativi all'accuratezza delle parti prodotte tramite VPP è “l'imbarcamento” delle superfici (soprattutto quelle larghe). Ogni *layer* che viene solidificato è soggetto a forze interne che generano dello stress: quando uno strato solidifica sopra un altro verrà a generarsi un maggior stress. Il risultato è la deformazione del pezzo. I supporti, oltre a permettere la realizzazione di parti a sbalzo, aiutano a tenere in posizione e a contrastare la generazione di forze interne che potrebbero modificare la geometria della parte. È importante anche orientare il modello in modo da non avere aree di sezioni particolarmente estese che sono più soggette a questo effetto.

Oltre alla rapidità con cui è possibile ottenere gli oggetti, la VPP è indicata anche per la realizzazione di parti con una superficie particolarmente accurata e liscia, paragonabili alle caratteristiche delle parti ottenute per stampaggio a iniezione. La grande limitazione, invece, deriva proprio dai materiali usati,

	Top down
Advantages	<ul style="list-style-type: none"> - A faster printing process as the print does not need to be separated from the build plate after each layer is printed - The forces on the part are much lower than bottom up printers - Because parts do not need to be printed at an angle, less support material is needed - The printers are generally considered more reliable
Disadvantages	<ul style="list-style-type: none"> - Machines are much larger as more resin is needed - Thickness of the resin between the surface and the top of the part must be consistently controlled - Changing resin is difficult & replacing resin tanks is expensive

Figura 2.4: tabella dei vantaggi e svantaggi dell'architettura “*top-down*”. (Redwood et al., 2017)

	Bottom up
Advantages	<ul style="list-style-type: none"> - Requires little resin as the part is pulled out of the vat meaning machines can be smaller - Easy to control the thickness of each layer
Disadvantages	<ul style="list-style-type: none"> - Requires the resin window/vat to be replaced regularly to maintain optimal print conditions - Increased likelihood of print failure due to peeling stage and forces from gravity (weight of the part) - Parts must be printed at an angle increasing build time and cost

Figura 2.5: tabella dei vantaggi e svantaggi dell'architettura “*bottom-up*”. (Redwood et al., 2017)

2.1 Materiali per VPP

poiché questi hanno vita tipicamente limitata: sono soggetti a perdita di proprietà meccaniche nel tempo e degrado se sottoposti a luce solare. Spesso la soluzione è l'applicazione di uno strato di materiale (vernice) che protegga il foto-polimero dall'ambiente esterno.

In generale i prodotti ottenuti tramite SLA e DLP non vengono impiegati per applicazioni funzionali: vengono viceversa utilizzati per la realizzazione di prototipi che simulano oggetti ottenuti tramite stampaggio a iniezione, vengono usati nel campo della gioielleria (come modelli sacrificabili da usare nello stampaggio per colata), nelle applicazioni dentali e per la creazione di apparecchi acustici personalizzati. Uno dei motivi principali del loro utilizzo è l'alta qualità superficiale.

I materiali che servono per la realizzazione delle parti sono definiti come materia prima. Le loro proprietà meccaniche, fase di stato, forma, composizione chimica, sono fattori che influenzano il processo e la qualità con cui questo avviene. Abbiamo detto che le materie prime possono presentarsi sotto forma di liquido o solido (filo o polvere). La catena di processo può essere descritta in termini di mono-fase o pluri-fase: la mono-fase vede la creazione dell'oggetto e il suo raggiungimento di proprietà e finiture, intese come modello finale, in un unico passaggio; la pluri-fase vede la realizzazione della geometria e successivamente tutti i passaggi hanno lo scopo di migliorare la forza, densità e altre proprietà.



Resina fotopolimerica "Dental Model" della FormLabs per tecnologie SLA.
<https://formlabs.com/materials-hub/>

Ogni processo additivo fa' uso di uno o più materiali di una o più specifiche tipologie e ciò comporta un attento stoccaggio per non alterare lo stato fisico-chimico, che potrebbe compromettere l'esito della stampa. Nel caso della VPP, le resine fotosensibili sono additivate con diversi elementi, i quali potrebbero depositarsi sul fondo. Ciò comporterebbe di dover rimettere in sospensione queste particelle prima dell'uso, quindi provvedere a un sistema/processo di rimestaggio. Il primo brevetto che descrisse la resina per il processo di stereolitografia fu pubblicato nel 1990.

Le resine fotopolimeriche fanno parte della categoria dei polimeri termoindurenti, quindi non è possibile fondere il solido così ottenuto. Gli ingredienti principali con cui sono realizzate sono monomeri, fotoiniziatori e oligomeri. I fotoiniziatori hanno lo scopo di incrementare il tasso di fotopolimerizzazione oppure spostare il valore di lunghezza d'onda utile ad attivare la reazione. Le prime tipologie vennero create usando una combinazione di acrilati e fotoiniziatori. La seconda variante fu quella con gli *epoxide* che sostituirono gli acrilati. Ad oggi viene utilizzata una base composta da entrambi gli additivi, così da ottenere i vantaggi di entrambi. Per migliorare e proteggere la resina, vengono aggiunti degli agenti stabilizzanti che prevengono la polimerizzazione spontanea causata dalla luce o dal calore. È necessario quindi tenere la resina in luoghi a temperatura controllata, priva di umidità e lontana da fonti di luce.

Le tipologie di liquido che vengono usate sono varie e differiscono per proprietà, come la viscosità che può variare dai 100 ai 400 cps. Parte della definizione di liquido è la sua capacità di avere volume ma non forma, infatti questo prenderà la forma del contenitore in cui si trova. La viscosità influisce su questa caratteristica rendendo, per esempio, più veloce o lenta

la fase di "adattamento" della forma al contenitore. Materiali con bassa viscosità verranno usati in stampanti 3D che avranno configurazioni diverse da quelle che usano materiali ad alta viscosità (liquidi carichi di particelle).



Resina fotopolimerica "Standard Photopolymer Resin" della Elegoo per tecnologie LCD. <https://www.elegoo.com/collections/resin>

2.2 Strumenti per la progettazione 3D

Per poter realizzare un progetto 3D il metodo più comune è l'uso del CAD. Tre sono le tipologie di modellazione su cui si basano i modellatori CAD: modellazione solida, modellazione di superfici e *sculpting*. La modellazione solida genera modelli 3D come se questi fossero delle vere e proprie parti (piene), lavorando il pezzo in modo simile al processo produttivo tradizionale. Si lavora per addizione o sottrazione di volume, tagliando, estraendo, fino ad arrivare alla forma voluta. Di solito questa metodologia è parametrica: se dovesse essere cambiato un parametro durante il percorso di realizzazione del pezzo, allora il modello si aggiornerebbe in funzione del cambiamento, da quel punto fino alla fine. Inoltre è possibile applicare dei movimenti ai componenti modellati in modo da studiare l'eventuale assemblaggio delle parti. La modellazione di superfici è tipicamente usata per la progettazione di forme organiche. Questa metodologia sfrutta una matrice di punti, detti "poli" o "punti di controllo", sopra la superficie che permettono la manipolazione della geometria. Le limitazioni di questo processo sono l'accuratezza e l'effettiva possibilità di riuscire a realizzare il modello tramite la manifattura tradizionale. Inoltre risulta difficile modificare parametri impostati precedentemente, infatti questi programmi non sono parametrici. Per quello che riguarda lo *sculpting*, questo viene impiegato per la realizzazione di forme libere (*freeform*) caratterizzate da dettagli talvolta complessi e intricati. I programmi che permettono ciò sono pensati per affrontare la modellazione come se si stesse realmente modellando una scultura, sottraendo, aggiungendo, tirando, allungando il modello.

Quando si progetta un componente, spesso è richiesto che questo sia minimizzato il più possibile, in termini di volume

e massa, mentre mantenga l'integrità strutturale necessaria. L'ottimizzazione topologica è un metodo usato per ottimizzare proprio la geometria del pezzo e necessita di diverse informazioni:

- modello esistente
- processo produttivo
- carichi e vincoli applicati
- obiettivi
- vincoli di ottimizzazione

Il risultato ottenuto genera forme organiche che sono ideali per la realizzazione tramite processi additivi. Il processo di ottimizzazione aiuta durante le fasi di progettazione affinché si raggiunga la forma più adatta, infatti può essere ripetuto più volte per ottenere la miglior geometria. Di contro, quindi, l'ottimizzazione topologica non prevede ad una soluzione ottenibile tramite un click.

È richiesto alcune volte di dover studiare un componente già esistente, di cui però non è possibile ottenere il modello 3D. Si ricorre in questo caso al *reverse engineering*, ovvero una metodologia che ripercorre al contrario i passaggi che si compiono per ottenere il pezzo finale: si studia un componente dal vero per arrivare ad ottenere il modello 3D. Per fare ciò è possibile impiegare misurazioni fisiche sul pezzo (se questo lo consente) o scansioni tridimensionali.

2.3 Progettare per VPP

Alcune delle criticità comuni associate alle stampe 3D è la formazione di crepe e deformazioni. Queste, normalmente, sono causate dalla temperatura e dalla fotopolimerizzazione. Nel primo caso le tensioni interne sono la causa principale, infatti lo stress si accumula nella sovrapposizione continua degli strati, sottoponendo il pezzo a diverse temperature durante il processo: i primi strati si raffredderanno e tenderanno a contrarsi, generando delle forze interne anche nei *layer* vicini. Se queste forze hanno intensità elevata deformeranno la geometria e ciò, in casi estremi, porterà alla rottura. Nel caso dei fotopolimeri essi sono soggetti a forze interne quando viene irradiato un *layer* e questo solidifica: la polimerizzazione dello strato successivo genera dello stress tra i due che può portare alla deformazione. Per poter mitigare l'azione delle forze generatrici di stress tra i *layer* è possibile far uso di accorgimenti che aiutino durante il processo di stampa:

- È possibile generare una temperatura controllata favorevole all'interno dell'area di stampa per evitare che si generi stress termico sul pezzo.
- Come progettista, è possibile disegnare il componente in modo che questo non abbia aree di sezioni spesse e larghe, magari collegate successivamente a pareti sottili.
- Uno spessore costante aiuta nella prevenzione di forze interne.
- Orientare il pezzo in modo corretto può aiutare il processo.

- L'uso di supporti permette di generare un ancoraggio tra il pezzo e il piatto di stampa, assicurando così che venga mantenuta la posizione.

I supporti non vengono generati solo per garantire che il pezzo non si deformi, ma anche per poter ottenere geometrie che altrimenti non sarebbe possibile creare con la tecnologia additiva. Abbiamo detto che questo tipo di tecnologia permette di realizzare forme estremamente complesse e ciò è possibile proprio grazie all'impiego delle strutture di supporto. Le parti del pezzo che risultano a sbalzo, o con una inclinazione troppo sporgente potrebbero non essere realizzate a dovere a causa del principio base della stampa 3D: l'aggiunta di strati uno su l'altro. Per evitare ciò vengono generati, insieme al pezzo, anche delle strutture che sostengano la parte a sbalzo così da garantire il successo della stampa. È importante decidere non solo la tipologia di supporto, ma anche la posizione, la quantità e l'organizzazione all'interno dell'area di stampa, visto che al termine dell'operazione bisognerà rimuovere tutto il materiale in eccesso.

I raccordi o smussi aiutano a ridurre ulteriormente la concentrazione di forze interne sugli spigoli e sui lati del componente. Aiutano inoltre la rimozione del pezzo dall'area di stampa.

Entrambe le tipologie di architettura, *bottom-up* e *top-down*, necessitano dell'uso di supporti durante il processo di stampa. Questo perché provvedono ad ancorare e mantenere in posizione il modello, evitando casi di deformazione della geometria, e a sostenere le parti a sbalzo. A differenza di altre tecnologie additive, i supporti vengono costruiti a partire dallo stesso

materiale con cui è fatto il componente finale, perciò bisognerà provvedere alla rimozione delle parti in eccesso rompendole o tagliandole. È importante quindi capire, durante la fase di progettazione, quale sarà il processo con cui si andrà a realizzare il pezzo, così da intervenire fin da subito su quelle che potrebbero divenire criticità durante la fase di stampa. È importante anche organizzare in modo corretto il o i pezzi da mettere all'interno dell'area di stampa, posizionandoli e orientandoli nel modo più efficace ed efficiente, garantendo anche il minor numero di strutture di supporto. Tra il *bottom-up* e il *top-down*, il primo è quello che richiede maggiori attenzioni da parte del progettista/operatore. Di seguito sono riportate alcune linee guida per una buona preparazione del modello alla stampa:

- le parti dovrebbero essere orientate in modo che il loro asse longitudinale sia parallelo al fronte della macchina;
- le parti dovrebbero essere orientate in modo da ridurre l'area di sezione di ogni layer così da ridurre le forze che si potrebbero generare durante la fase di distacco dal fondo;
- le cavità chiuse non dovrebbero essere orientate, in modo che queste siano davanti la vasca;
- le parti dovrebbero essere orientate in modo che favoriscano la realizzazione dei layer precedenti. Ciò è particolarmente importante per piccole e intricate forme.

Una buona regola, che aiuta nell'orientamento del pezzo nelle stampanti di tipo *bottom-up*, è la seguente:

1. allineare il pezzo in modo che il suo asse longitudinale sia parallelo all'asse X
2. ruotare di 60° intorno l'asse Y
3. ruotare di 30° intorno l'asse Z
4. generare i supporti

La progettazione di parti con delle sezioni vuote è un problema da affrontare nella realizzazione delle stampanti 3D. Ciò perché potrebbe essere richiesto di generare supporti all'interno della geometria cava e questi non potrebbero essere più rimossi. Inoltre verrebbe intrappolata la resina quando la cavità viene chiusa. In aggiunta, durante il processo di stampa la particolare geometria potrebbe generare degli effetti di depressione all'interno del pezzo, creando così un "effetto ventosa" che ostacola il distacco dal fondo della vasca e causando così il fallimento del processo (Fig. 2.6). La soluzione a questi problemi è la realizzazione di fori, possibilmente due in posizioni opposte, che favoriscano la fuoriuscita della resina e il passaggio dell'aria (Fig. 2.7). Normalmente è accettabile che il foro sia da 4 mm di diametro e può essere posto in qualsiasi punto della geometria.

No escape hole

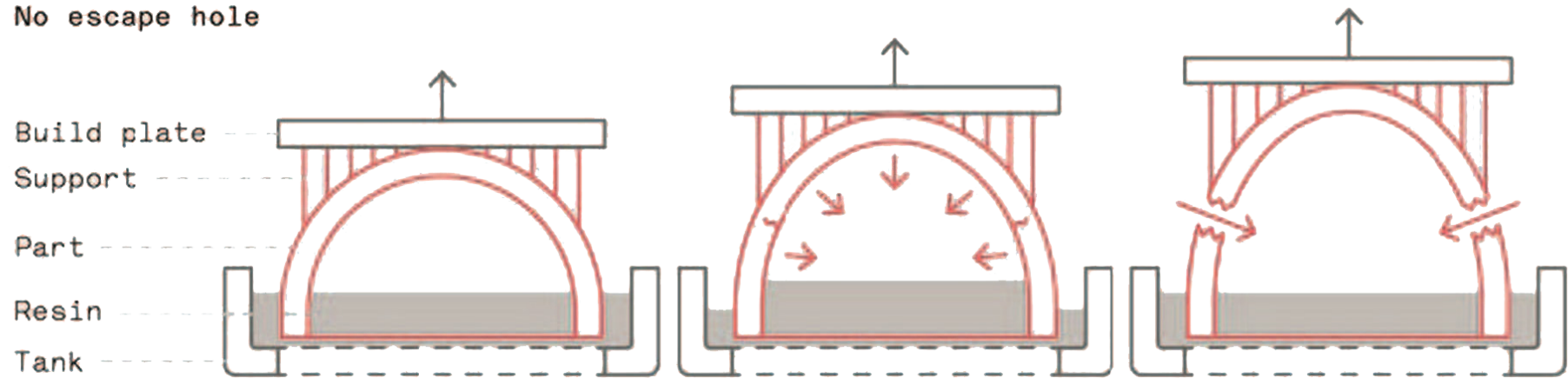


Figura 2.6: geometria cava priva di fori.
(Redwood et al., 2017)

With escape hole

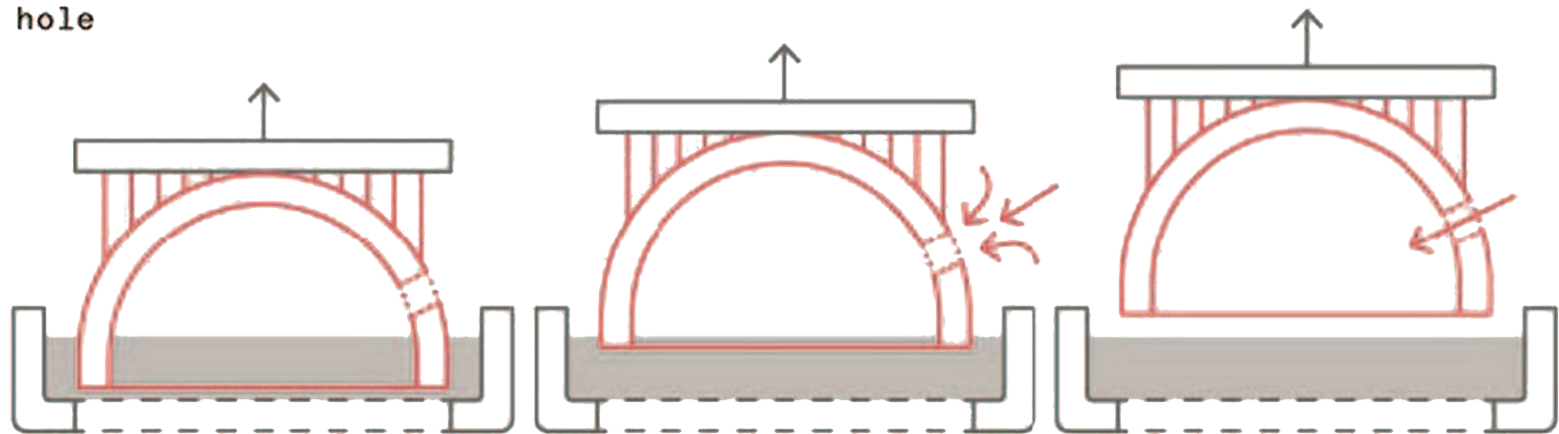


Figura 2.7: geometria cava con foro.
(Redwood et al., 2017)

3 Mask Projection VPP

Oltre alle stampanti FFF, la tipologia MPVPP ha avuto e continua ad avere successo nel mondo dei professionisti e non. Se da un lato vi è la semplicità nella realizzazione di un pezzo, ma con finiture discrete proprie della FFF, dall'altro c'è la *mask projection* che offre un'ottima qualità superficiale ed estetica però il processo di stampa è più complesso.

Il principale vantaggio di questa famiglia di tecnologie VPP è la velocità del processo di fotopolimerizzazione del *layer*: è possibile polimerizzare l'intera area di sezione in un solo passaggio, cosa che non avviene nelle tipologie *vector scan*. Le macchine MPVPP sfruttano una lampada UV come sorgente luminosa per irradiare la resina: la differenza con l'altra tecnologia è come i raggi UV vengono direzionati verso la vaschetta. Sono impiegati dei *Digital Micromirror Device* (DMD) detti anche "spaziatori modulari di luce", oppure dei *Liquid Crystal Display* (LCD). Lo scopo di questi dispositivi è quello di ostacolare o meno il passaggio della radiazione che viene proiettata. Durante il processo di *slicing* il modello CAD viene "affettato" così da ottenere diversi strati rappresentanti le sezioni del file: ogni sezione viene raccolta e convertita sotto forma di *bitmaps* affinché possa essere riprodotta sul dispositivo. Nel caso del DMD (Fig. 3.1), la radiazione UV, che proviene lateralmente, verrà riflessa sulla vasca solo dalle parti che corrisponderanno alla sezione utile, andando a polimerizzare l'intera area di stampa solo dove richiesto dalla geometria per quello strato.

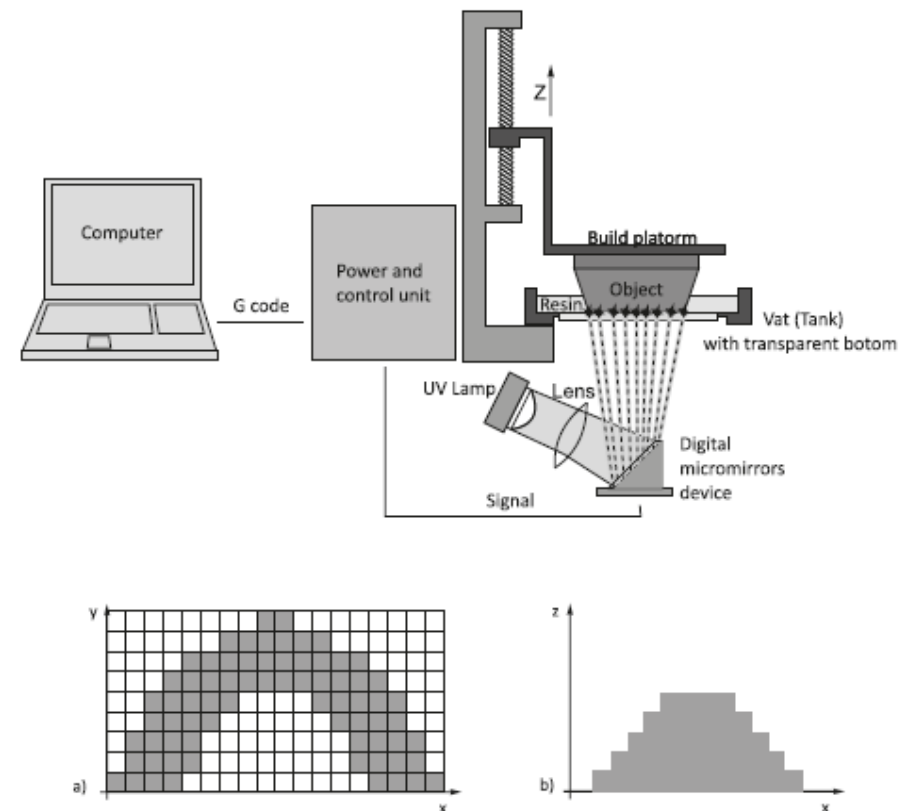


Figura 3.1: schema della tecnologia DMD con dettaglio della sezione irradiata. (Izdebska-Podsiadły, 2022)

Per il dispositivo LCD (Fig. 3.2), la luce UV è diretta verticalmente e proietta direttamente sulla vaschetta: il display, normalmente trasparente, è posto nel mezzo ed ostacola il passaggio della radiazione lì dove non è necessario polimerizzare la resina. Le stampanti che usano la tecnologia dei DMD sono chiamate *Digital Light Processing (DLP)*, mentre per quelle che impiegano i display a cristalli liquidi vengono chiamate LCD. Oltre a queste due tipologie vi è una terza chiamata *Digital Light Synthesis (DLS)* (Fig. 3.3) che presenta la stessa struttura della DLP, con la differenza nella possibilità di poter polimerizzare “in continuo” i vari strati uno dopo l’altro. Per fare ciò, questa tecnologia

sfrutta l’architettura *bottom-up* e un fondo della vasca che è permeabile all’ossigeno che entra a contatto con la resina sul fondo andando a creare una *dead zone* dove la polimerizzazione non viene innescata: in questo modo è possibile garantire un continuo riciclo di resina nuova, evitando di dover separare ogni *layer* appena formatosi dalla pellicola per andare a riempire nuovamente il fondo.

Le tecnologie VPP vengono impiegate soprattutto per l’alta qualità dei risultati dal punto di vista estetico: come abbiamo detto queste tecnologie sfruttano il processo di fotopolimerizzazione per solidificare uno strato che ha uno

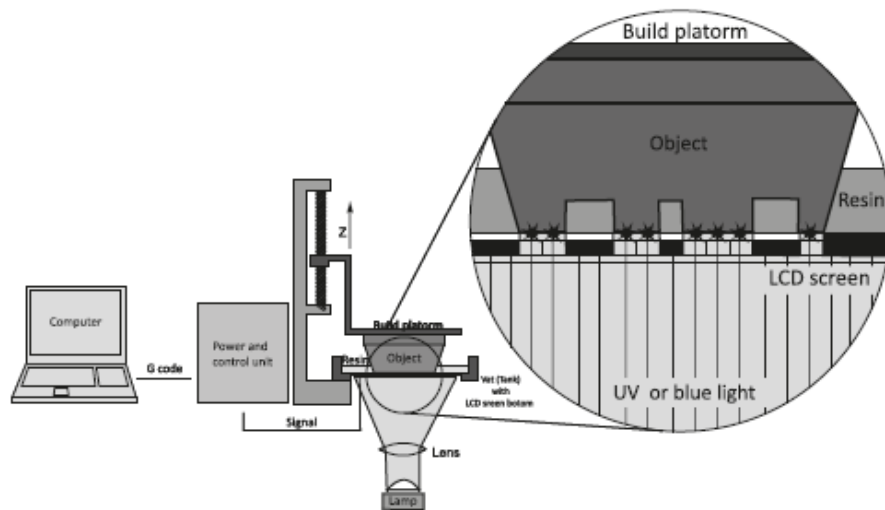


Figura 3.2: schema della tecnologia LCD. (Izdebska-Podsiady, 2022)

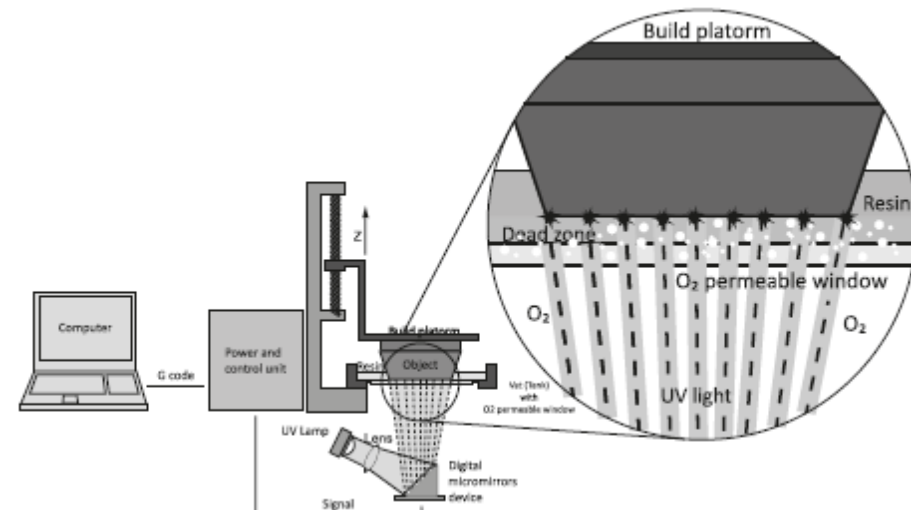


Figura 3.3: schema della tecnologia DLS. (Izdebska-Podsiady, 2022)

spessore dai 25 ai 100 micron. Ciò vuol dire che l'effetto a scalini, conseguenza della solidificazione dei layer uno di seguito l'altro, è poco percepibile dall'occhio umano e l'oggetto risulterà avere una superficie più o meno omogenea e liscia. Per questo motivo la stereolitografia o anche le altre tecnologie sono utilizzate per scopi rappresentativi, dove è richiesta un'alta definizione dei dettagli e per confrontare la parte con una realizzata tramite stampaggio a iniezione. Normalmente è possibile trovare queste stampanti 3D presso laboratori che progettano e lavorano gioielli (Fig. 3.4), studi dentistici per la realizzazione di protesi dentali o per la realizzazione di apparecchi acustici personalizzati (Fig. 3.5). La famiglia delle MPVPP è quella che più trova utilizzo in questi laboratori, nonostante abbiano una risoluzione più bassa rispetto alle *vector scan*. La motivazione sta nella rapidità con cui possono eseguire il processo di polimerizzazione: questa tipologia impiega un tempo definito per realizzare uno strato, che questo sia totalmente da polimerizzazione o meno; la SLA, per esempio, ha un tempo di stampa per strato che è dipendente dall'area da irradiare. In altre parole, avere una sezione o 10 sezioni di pezzi da stampare con la MPVPP ci vorrà lo stesso tempo, mentre, nella stessa condizione, una SLA impiegherà un tempo maggiore all'aumentare del numero delle sezioni da eseguire perché il laser dovrà tracciare un'area maggiore.

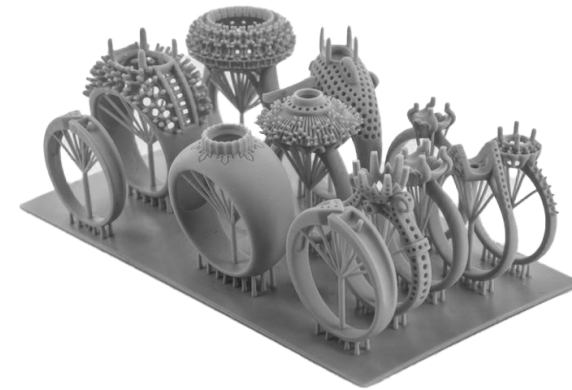


Figura 3.4: prototipi di anelli realizzati tramite tecnologia DLP. (Izdebska-Podsiadły, 2022)



Figura 3.4: apparecchi acustici realizzati con tecnologia SLA. (Izdebska-Podsiadły, 2022)

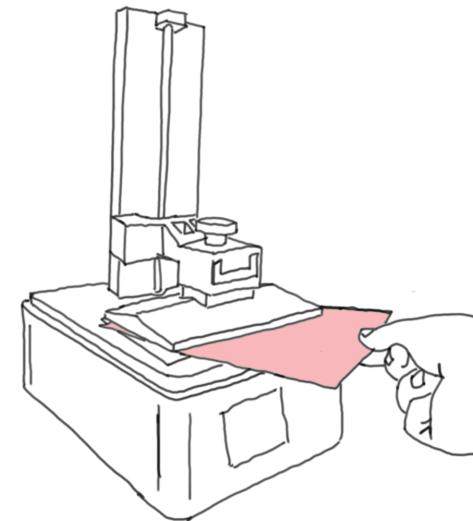
3.1 Il processo di stampa 3D tramite LCD

La stampante di cui si tratta in questo elaborato fa' uso della tecnologia LCD, quindi si affronterà la descrizione del processo di stampa di questa macchina, nello specifico della preparazione di questa per la messa in opera, poiché d'interesse per l'elaborato. Le fasi successivamente descritte sono comuni a tutte le tipologie MPVPP, salvo alcune specifiche differenze.

Le stampanti LCD sono composte da diversi componenti che possono essere raggruppati per semplicità nelle seguenti parti: la base, che contiene tutta l'elettronica e la componentistica utile all'alimentazione, alla sorgente UV, al display LCD e all'interfaccia della macchina per il controllo dei parametri; la struttura dell'asse Z, composta da una barra filettata, guide lineari con i relativi carrelli e dei profilati che supportano la struttura; il piatto, assicurato con un sistema di fissaggio a un braccio, il quale è vincolato allo scorrimento verticale condotto dalla barra filettata; la vaschetta, che si compone di una cornice al di sotto della quale vi sono avvitate altre due piccole cornici che tengono in posizione e in tensione la pellicola trasparente posta sul fondo; il coperchio, che permette di contenere i fumi all'interno di esso e proteggere la resina da radiazioni provenienti da fonti esterne.

Nei capitoli precedenti è stato detto come il modello 3D del componente viene trasferito sul software di *slicing* per poter essere sottoposto a controllo e preparazione per la stampa. Ottenuta la raccolta di *bitmaps* rappresentante le sezioni del modello si passa alla preparazione per la messa in opera della macchina:

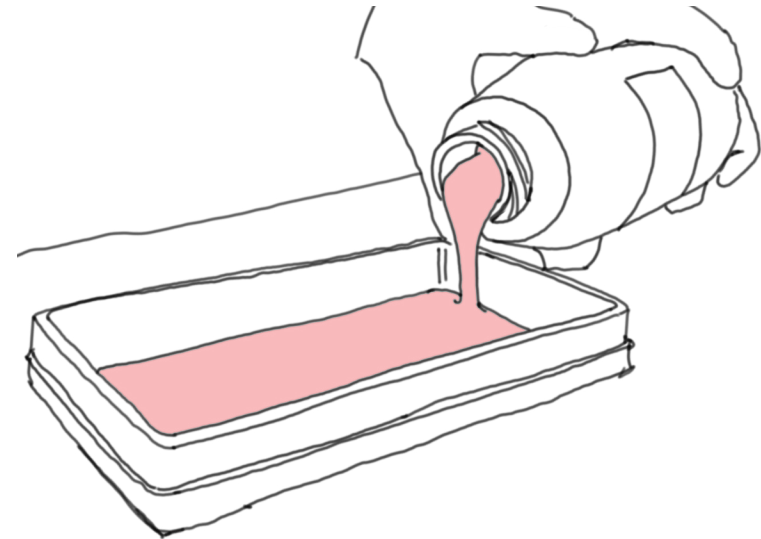
1. Calibrazione del piatto: è il primo passo necessario calibrare il piatto della stampante affinché questo sia perfettamente parallelo al fondo della vaschetta ed abbia una corretta distanza da questo. Dopo aver rimosso la vaschetta, generalmente viene impiegato un foglio di carta, di spessore 0,10-0,15 mm circa, posto sul piano dove poggia la vaschetta e il piatto deve scendere fino a schiacciare il foglio. A questo punto si cerca di trovare l'altezza corretta affinché il foglio possa scivolare via senza troppa resistenza. Facendo ciò sarà possibile ottenere la distanza "zero" dal fondo del contenitore. Infine si imposta l'altezza trovata come zero del piatto.



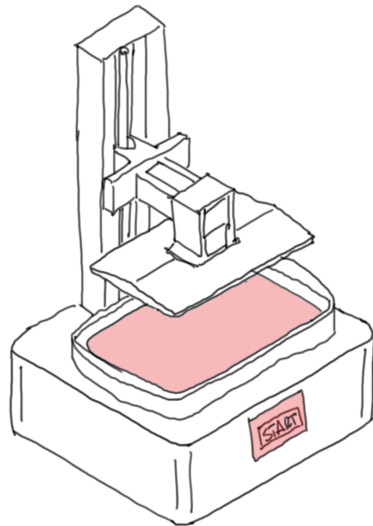
2. Preparazione della resina: l'operatore prende la resina scelta, normalmente contenuta in bottiglie da 0,5 kg o 1 kg, e la agita per riportare in sospensione i vari costituenti presenti nel liquido. Questa operazione è necessaria ogni volta poiché si possono verificare delle precipitazioni e quindi una separazione degli elementi (catalizzatori, fotoiniziatori) che portano ad una errata polimerizzazione della resina.



3. Riempimento della vaschetta: dopo aver riposizionato ed assicurato la vaschetta, l'operatore può versare la resina all'interno. In questa fase è importante prestare attenzione allo stato turbato della resina in quanto si sono generate bolle durante l'agitazione del liquido. Inoltre è necessario versare una quantità sufficiente e non superare il limite massimo, segnato sul bordo interno delle pareti, affinché si eviti il rischio di fallimento della stampa o straripamenti durante l'immersione del piatto.



4. Avvio del processo: con la chiusura della stampante, normalmente mediante il riposizionamento del coperchio sopra la base, è possibile caricare il file nel sistema della macchina, selezionarlo ed iniziare il processo. La macchina porterà nella posizione 0 il piatto e inizierà così a sollevarlo, strato per strato, dopo aver polimerizzato la resina.



3.2 La ricerca scientifica sulle tecnologie MPVPP

Una delle criticità che si vuole affrontare, presenti nelle fasi sopra descritte, è la presenza di bolle nella resina che si versa all'interno della vaschetta (Fig. 3.5). La necessità che la resina sia priva di queste formazioni di aria è legata alla qualità della polimerizzazione che in alcuni casi può portare al fallimento della stampa. Le bolle, piccole o grandi che siano, sono delle zone prive di resina che creano dei vuoti di materiale nel *layer* così realizzato. Generalmente vi è un accumulo di queste più sul bordo del piatto che al suo interno: ciò va ad influenzare la qualità superficiale esterna che non risulterà più liscia e omogenea. Il dettaglio di questa malformazione è spesso molto piccolo, ma



Figura 3.5: dettaglio dello stato turbato della resina dopo il riempimento della vaschetta.

comunque visibile ad occhio nudo e costituisce un problema da non sottovalutare visto l'impiego di questa tipologia di stampanti per la realizzazione di parti con dettagli molto piccoli. Per poter ovviare a ciò sarebbe richiesto di aspettare tempo sufficiente affinché le bolle scompaiano e la resina si stabilizzi: l'attesa può durare anche più di 30 minuti.

La ricerca fatta si è concentrata su articoli scientifici e testimonianze documentate che potessero descrivere meglio questa criticità. Diverse sono le raccolte scientifiche che descrivono in modo generale e non i problemi legati alla tecnologia mask projection e alla resina fotopolimerica. In questa sezione viene riportato un paper di ricerca che tratta proprio del comportamento del liquido fotopolimerico nelle stampanti facenti parte dell'architettura *bottom-up*, pubblicato sulla rivista "Additive Manufacturing" che raccoglie ricerche scientifiche ed analisi dal mondo accademico ed industriale nei confronti di tutto ciò che riguarda l'AM.

Durante il processo di fotopolimerizzazione per le stampanti *bottom-up*, la piattaforma di stampa si solleva dopo che ogni strato è stato fotopolimerizzato per consentire al liquido della resina di rifluire e quindi si abbassa per preparare lo strato successivo, causando la deformazione della membrana di rilascio della stampante. Per garantire una qualità di stampa ottimale, è essenziale determinare il tempo di attesa necessario affinché la membrana si riprenda e la resina drena e diventi stazionaria prima di fotopolimerizzare lo strato successivo. (Cao et al., 2023)

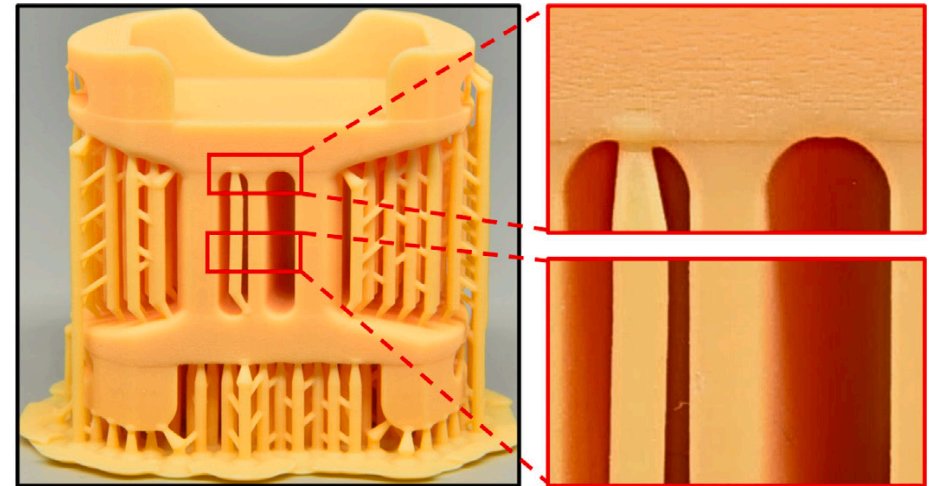


Figura 3.6: componente che presenta due finiture superficiali: la parte inferiore risulta essere più omogenea e liscia di quella superiore. (Cao et al., 2023)

Com'è possibile notare dalla Fig. 3.6, le due foto a destra mettono in evidenza la qualità della superficie esterna del pezzo stampato: in alto è evidente una superficie non omogenea conseguenza della resina "turbata"; in basso invece è possibile notare come la parete esterna risulti senza difetti. Questa testimonianza sottolinea l'importanza dello stato in cui si trova la resina nel momento della polimerizzazione andando a richiedere maggiore attenzione da parte dell'operatore.

3.3 Stato dell'arte

Avendo in mente la causa di queste imperfezioni, la seconda parte della ricerca si è concentrata sulla ricerca di soluzioni esistenti e l'analisi di queste. Come si potrà constatare successivamente, queste soluzioni si divideranno in due categorie, "dirette" o "indirette": per "dirette" ci si riferisce a quelle proposte che mirano direttamente a risolvere il problema sopra descritto; per "indirette" si vuole rappresentare tutte quelle idee che affrontano la criticità, ma come fine secondario, interessandosi a risolvere un'altra problematica.

Le soluzioni "dirette" raccolte sono quelle della FormLabs, dell'Anycubic e il progetto *do it yourself* (DIY) di *OneIdMONstr*. Queste proposte mirano a rendere la fase del riempimento della vaschetta automatica, mediante l'uso di sistemi elettromeccanici implementati nella stampante (FormLabs) oppure esterni ad essa. Tra questi il sistema *Resin Dispensing System* della FormLabs è quello che meglio riesce nel suo intento, dando anche la possibilità di stoccare la vaschetta, contenente ancora la resina, per un secondo utilizzo senza la necessità di drenarla. Il funzionamento risiede nell'implementazione di un sistema *trigger* (Fig. 3.7) nella stampante, che quando attivato apre la valvola posta sul fondo del contenitore della resina facendola fluire fin dentro la vaschetta: la modellazione ad hoc del contenitore e la presenza di un lettore RFID (Fig. 3.8) permette una integrazione totale all'interno della macchina, ottenendo il controllo automatico della fase di riempimento della vaschetta. Questo sistema però è limitato all'ecosistema FormLabs, perciò non utilizzabile da altre stampanti e marche. Le altre due soluzioni condividono molte analogie, tra cui l'adattabilità del kit a diverse stampanti e quindi la possibilità di un uso su più macchine. L'unico svantaggio che condividono è la necessità



Figura 3.7: dettaglio del Resin Dispensing System della FormLabs: *trigger*.
<https://support.formlabs.com/s/article/Resin-dispensing-system?language=it>



Figura 3.8: dettaglio del Resin Dispensing System della FormLabs: RFID.
<https://support.formlabs.com/s/article/Resin-dispensing-system?language=it>

di una alimentazione esterna, poiché il loro funzionamento è dettato dall'uso di una pompa che spinge l'aria all'interno della stessa bottiglia contenente la resina tramite un tappo realizzato appositamente: l'aria che entra all'interno spinge la resina a risalire in un secondo canale e procede direzionata nella vaschetta, dove un sensore è posto per segnalare il livello corretto del liquido.

Le soluzioni "indirette" invece presentano delle interessanti caratteristiche, quali il completo funzionamento tramite componenti meccaniche semplici, senza l'ausilio di parti elettroniche. Queste proposte sono state concepite per ridurre al minimo il rischio di terminare la resina durante la stampa di parti voluminose o comunque processi che richiedono molto tempo ed andare così verso il fallimento: non sono state pensate per il riempimento della vaschetta. Nel caso della Elegoo (Fig. 3.9) si fa uso di un tappo specifico che presenta una valvola e una molla di richiamo: sostituendo questo tappo a quello standard sulla bottiglia, sarà possibile inserire questa capovolta nell'apposita sede della vaschetta dove verrà attivata la valvola dalla pressione generata e così facendo il fluido uscirà. Data la geometria del tappo, quando il livello della resina andrà a coprire la parte inferiore di questo il flusso si interromperà poiché non ci sarà più passaggio di aria; riprenderà invece quando questo scenderà nuovamente al di sotto man mano che la resina viene polimerizzata. Il progetto DIY di *fhuable* (Fig.3.10) sfrutta lo stesso principio ma senza l'ausilio di una valvola: la resina viene travasata in un serbatoio dedicato con un tubo che porta direttamente nella vaschetta. Quando il livello del liquido sommerge completamente il foro di uscita la resina non fluisce, invece se è scoperto, l'aria entra dentro e la resina viene rilasciata

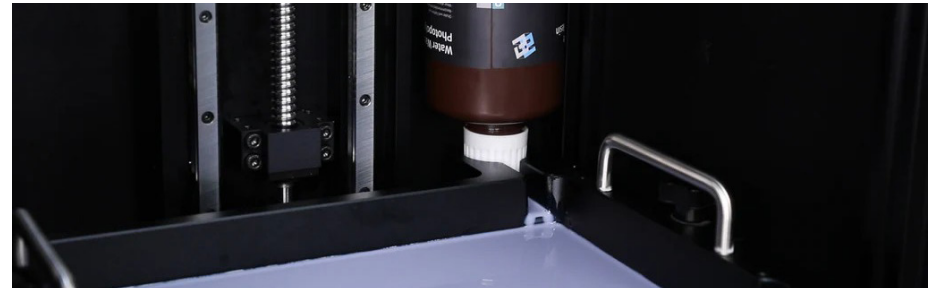


Figura 3.9: Automatic Resin Feeding della Elegoo.
<https://www.elegoo.com/en-it/products/elegoo-jupiter-resin-3d-printer-6k-mono-msla-3d-printer>

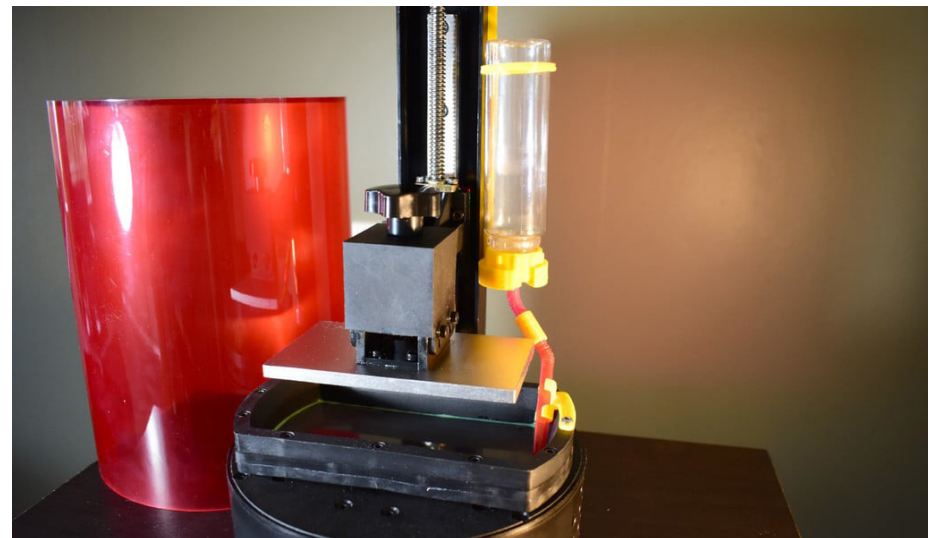

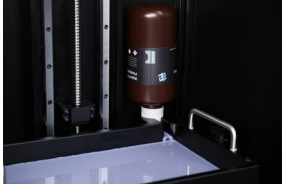
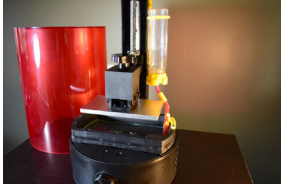
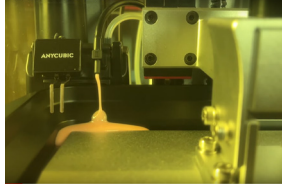
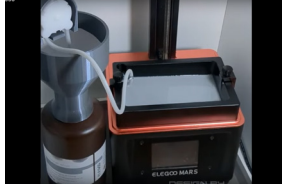


Figura 3.10: Sparkmaker Vat Extender di fhuable.
<https://www.thingiverse.com/thing:3074612>

fino a che non si ritorna al livello descritto precedentemente. La semplicità con cui è possibile realizzare o reperire le componenti per questo progetto lo rende adattabile a molte altre macchine, a patto di progettare un sicuro sostegno per il serbatoio esterno. Entrambe le soluzioni "indirette" non possono essere utilizzate per riempire la vaschetta quando questa è vuota, poiché il tempo che ci impiegherebbero risulterebbe troppo elevato.

3.3.1 Tabella comparativa

					
SOLUZIONE PROPOSTA	RESIN DISPENDING SYSTEM (FORMLABS)	AUTOMATIC RESIN FEEDING (ELEGOO)	SPARKMAKER VAT EXTENDER (FHUABLE)	AUTO RESIN FILLER MODULE (ANYCUBIC)	RESIVAC 1000 (ONELDMONSTR)
TIPOLOGIA SOLUZIONE	DIRETTA	INDIRETTA	INDIRETTA	DIRETTA	DIRETTA
PROPRIETÀ INTELLETTUALE	PROPRIETARIA	PROPRIETARIA	CC BY-NC-SA	PROPRIETARIA	CC BY-NC-SA
FUNZIONE PRINCIPALE	AUTOMATIZZAZIONE E CONTROLLO ATTIVO DEL PROCESSO DI RIEMPIMENTO	CONTROLLO PASSIVO DEL LIVELLO	CONTROLLO PASSIVO DEL LIVELLO	AUTOMATIZZAZIONE E CONTROLLO ATTIVO DEL PROCESSO DI RIEMPIMENTO	AUTOMATIZZAZIONE E CONTROLLO MANUALE DEL RIEMPIMENTO E DRENAGGIO
FUNZIONAMENTO	SISTEMA ELETTRO-MECCANICO PER IL PROCESSO DI RIEMPIMENTO	SISTEMA MECCANICO PER IL PROCESSO DI RIEMPIMENTO	SISTEMA MECCANICO PER IL PROCESSO DI RIEMPIMENTO	SISTEMA ELETTRO-MECCANICO PER IL PROCESSO DI RIEMPIMENTO	SISTEMA ELETTRO-MECCANICO PER IL PROCESSO DI RIEMPIMENTO E DRENAGGIO
TARGET	ESCLUSIVO PER LE RESINE E LE MACCHINE SLA FORMLABS	ESCLUSIVO PER LE RESINE E LE MACCHINE LCD ELEGOO	PROGETTO REALIZZATO PER MACCHINE LCD "SPARKMAKER"	ESCLUSIVO PER LE RESINE E LE MACCHINE LCD "PHOTON M3 PLUS" E "M3 MAX"	NON SPECIFICATO

**SOLUZIONE
PROPOSTA**



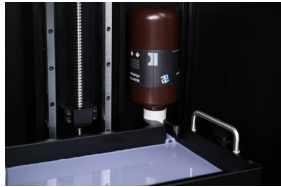
RESIN DISPENDING
SYSTEM
(FORMLABS)

VANTAGGI

RICONOSCIMENTO
AUTOMATICO RESINA
(RFID) - STOCCAGGIO
VASCHETTA

SVANTAGGI

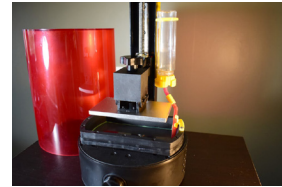
LIMITATO
ALL'ECOSISTEMA
FORMLABS



AUTOMATIC RESIN
FEEDING
(ELEGOO)

ADATTABILE A
DIVERSI FORMATI
DEI CONTENITORI DI
RESINA

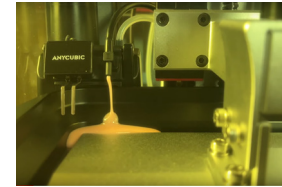
NON INDICATO PER
IL RIEMPIMENTO -
NECESSITA DI UNA
VASCHETTA SPECIFICA



SPARKMAKER VAT
EXTENDER (FHUABLE)

ADATTABILE
A STAMPANTI
DIFFERENTI

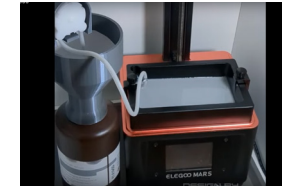
NON INDICATO PER IL
RIEMPIMENTO



AUTO RESIN FILLER
MODULE (ANYCUBIC)

ADATTABILE A
DIVERSI FORMATI
DEI CONTENITORI DI
RESINA

NECESSITA DI
ALIMENTAZIONE - KIT
MODULO ESTERNO



RESIVAC 1000

(ONELDMONSTR)

ADATTABILE
A STAMPANTI
DIFFERENTI -
ADATTABILE A
DIVERSI FORMATI
DEI CONTENITORI DI
RESINA

NECESSITA DI
ALIMENTAZIONE - KIT
MODULO ESTERNO -
CONTROLLO MANUALE

4 Obiettivi dell'elaborato

Lo scopo di questo elaborato è la ricerca e realizzazione di un sistema che possa limitare la presenza delle bolle all'interno della resina contenuta nella vaschetta, così da garantire una miglior qualità superficiale, ed automatizzare il processo di riempimento e mantenimento del livello all'interno della vaschetta. Le macchine AM a cui si destina questo sistema sono quelle della categoria MPVPP, più specificatamente quelle che usano la tecnologia LCD di media e grande taglia. La scelta mirata è motivata dalla maggior presenza negli ambiti professionali. Come conseguenza e valore aggiunto, il sistema sarà in grado di mantenere il livello minimo sufficiente del liquido all'interno della vaschetta passivamente senza l'ausilio di componenti elettroniche: così facendo si evitano sprechi, alimentazioni esterne e si riduce il rischio di stampe fallite a causa di un livello insufficiente di resina.

Per conseguire questo obiettivo è stato deciso di realizzare il sistema tramite l'uso delle AM, così da semplificare e poter essere accessibile a tutti i diretti interessati. Oltre ai consueti strumenti per la modellazione, software CAD parametrici e superficiali, sono stati utilizzati i software di *slicing* per la preparazione e la messa in stampa al fine di controllare e realizzare le componenti per il prototipo. Il processo di *Design for AM* e il design parametrico sono stati d'aiuto per tracciare le linee guida di una progettazione sicura, volta a garantire l'adattabilità del sistema a tutte le stampanti LCD di media e grande taglia. Per quanto riguarda la tecnologia AM impiegata per la realizzazione del prototipo, la scelta è stata fatta tenendo conto di alcune prerogative necessarie al conseguimento di questo elaborato: costo di produzione basso, rapidità di produzione, materiali sostenibili. La tecnologia FFF è quella

che più ha rispecchiato queste necessità, quindi si è proceduto a progettare il sistema sapendo di doverlo realizzare tramite questa macchina, rispettando quelli che sono i vincoli e limiti propri di quella tecnologia. Inoltre sono stati compiuti diversi processi di *reverse engineering* per ottenere informazioni utili sul dimensionamento delle componenti della stampante Anycubic Photon Mono X, la quale è stata considerata come modello su cui applicare il sistema.

Nel successivo paragrafo verranno descritti nelle loro generalità i metodi e gli strumenti impiegati per la realizzazione dell'elaborato. Nel capitolo successivo verranno raccolte e descritte le ipotesi e le prove sperimentali che hanno fatto parte del percorso, per arrivare al capitolo successivo ancora in cui si tratta del prototipo finale. I capitoli che seguono quello della prototipazione sono dedicati alla raccolta dei risultati, alla loro discussione e alle conclusioni.

4.1 Metodi e strumenti impiegati

I software CAD sono strumenti utilizzati per creare, modificare, analizzare o ottimizzare progetti in ambito ingegneristico, architettonico, meccanico e di design. Questi programmi forniscono strumenti digitali per disegnare oggetti in due o tre dimensioni con precisione, consentendo agli utenti di visualizzare, modificare e testare progetti prima della loro realizzazione fisica. I software CAD offrono una vasta gamma di funzionalità, tra cui:

- **Disegno e modellazione:** consentono di creare oggetti in diverse prospettive, dimensioni e complessità, spesso utilizzando strumenti di disegno geometrico o modellazione solida.
- **Analisi:** alcuni software integrano strumenti per analizzare le prestazioni dei progetti, come la resistenza strutturale, la fluidodinamica o la simulazione di stress.
- **Rendering e visualizzazione:** permettono di creare immagini realistiche o renderizzazioni dei progetti, consentendo agli utenti di vedere come apparirà il prodotto finale.
- **Collaborazione:** molti programmi CAD offrono funzionalità per la collaborazione in tempo reale, consentendo a più persone di lavorare sullo stesso progetto contemporaneamente.

- **Documentazione:** aiutano a generare documenti tecnici, schemi, diagrammi e altro materiale necessario per la produzione e la comprensione del progetto.

Alcuni esempi di software CAD includono AutoCAD, SolidWorks, CATIA, Autodesk Inventor, SketchUp e Fusion 360. Questi strumenti sono ampiamente utilizzati in diverse industrie, come l'ingegneria meccanica, l'architettura, l'industria automobilistica, l'aerospaziale e molte altre, per progettare e sviluppare una vasta gamma di prodotti e strutture. I software utilizzati per questo progetto sono RhinoCheros+Grasshopper e Fusion360.

Il design parametrico è un approccio alla progettazione che utilizza parametri e relazioni tra di essi per creare modelli digitali che possono essere facilmente adattati, modificati e ottimizzati in risposta a varie condizioni o input. Questo approccio si basa sull'uso di regole e relazioni definite dall'utente per generare forme, strutture o sistemi complessi. Le caratteristiche principali del design parametrico sono:

- Parametri e relazioni: i modelli parametrici sono definiti da variabili, o parametri, che possono essere regolati o modificati. Questi parametri sono collegati tra loro attraverso relazioni matematiche o logiche.
- Flessibilità e adattabilità: il design parametrico consente una maggiore flessibilità e adattabilità, consentendo agli utenti di apportare facilmente modifiche al modello senza dover ricostruire completamente il progetto.
- Iterazione e ottimizzazione: gli utenti possono eseguire rapidamente iterazioni sul design, esplorando molteplici opzioni e ottimizzando il modello in base a criteri specifici come prestazioni, costo, resistenza, forma, ecc.
- Automatizzazione: può coinvolgere l'automatizzazione di alcune fasi del processo di progettazione attraverso l'uso di script o algoritmi, permettendo la generazione automatica di forme o strutture basate su determinate regole o parametri.

- Design generativo: in alcuni casi, il design parametrico può essere utilizzato per generare automaticamente una gamma di possibili soluzioni in base a determinati input, consentendo la creazione di forme innovative e non intuitive.

Software come Grasshopper per Rhino, Dynamo per Autodesk Revit, e software basati su algoritmi come Processing o Rhinoceros 3D con plug-in specifici sono ampiamente utilizzati per eseguire il design parametrico. Questi strumenti consentono ai progettisti di creare forme complesse, adattabili e ottimizzate, consentendo una maggiore flessibilità nel processo creativo e una migliore risposta alle esigenze specifiche del progetto.

I software di *slicing* sono considerati parte dell'ambito del *Computer-Aided Manufacturing* (CAM), anche se la loro funzione è più specificamente legata alla stampa 3D anziché alle macchine utensili tradizionali come frese o torni. I software CAM sono strumenti utilizzati per convertire i progetti creati con software CAD in istruzioni specifiche per macchine utensili e robot industriali. Questi programmi consentono di tradurre i disegni e i modelli tridimensionali in percorsi di utensili, istruzioni di taglio e altre operazioni necessarie per la produzione fisica dei componenti. I software di *slicing* sono progettati per convertire i modelli 3D in istruzioni specifiche, sotto forma di file di stampa, che le stampanti 3D possono interpretare e utilizzare per creare oggetti fisici strato dopo strato. Questi programmi dividono il modello 3D in strati sottili, determinano i percorsi di stampa e generano il codice G-code (o un formato equivalente) che la stampante 3D può comprendere e eseguire. Le funzionalità principali di questi software includono:

- Orientamento e posizionamento: posizionano il modello 3D in modo ottimale per la stampa, minimizzando i supporti e massimizzando la qualità dell'oggetto finale.
- Impostazioni di stampa: consentono di personalizzare le impostazioni di stampa come la densità dello strato, la temperatura dell'estrusore, la velocità di stampa e altri parametri per ottenere risultati desiderati.

- Generazione del percorso di stampa: determinano il percorso esatto dell'estrusore o della testa di stampa per ciascuno strato, incluso il riempimento, gli attraversamenti e i percorsi periferici.
- Simulazioni e anteprime: offrono anteprime visive del processo di stampa, permettendo agli utenti di verificare e valutare il risultato finale prima della stampa effettiva.

Esempi di software di *slicing* includono Cura, Simplify3D, Slic3r, PrusaSlicer e Ultimaker Cura. Questi strumenti sono fondamentali per il processo di stampa 3D, fornendo il ponte tra il modello virtuale 3D e l'oggetto fisico stampato in 3D. Il programma utilizzato per la realizzazione tramite macchina FFF è PrusaSlicer.

Il *Design for Additive Manufacturing* (DfAM) è un approccio di progettazione specificamente mirato a sfruttare appieno i benefici e le potenzialità della stampa 3D o della produzione additiva. Questa metodologia si concentra sulla creazione di modelli ottimizzati e adattati alle capacità uniche offerte dalla stampa 3D, piuttosto che adattare progetti concepiti per metodi di produzione tradizionali. Alcuni concetti chiave del DfAM includono:

- Ottimizzazione topologica: utilizza algoritmi per generare geometrie ottimizzate, riducendo il peso e massimizzando la resistenza o l'efficienza del prodotto. Questa tecnica può risultare in strutture interne complesse che migliorano le prestazioni dell'oggetto.
- Consolidazione di parti: sfrutta la capacità della stampa 3D di creare strutture complesse o assemblaggi in un'unica parte. Questo può ridurre il numero di componenti necessari e semplificare l'assemblaggio.
- Utilizzo di materiali avanzati: sfrutta i materiali specifici e le proprietà uniche offerte dalla stampa 3D, come polimeri avanzati, leghe metalliche speciali o materiali compositi, per ottenere prestazioni specifiche.
- Ottimizzazione delle geometrie di supporto: considera la necessità di supporti durante la stampa 3D e progetta le geometrie in modo da minimizzare o eliminare la necessità di strutture di supporto, riducendo così il tempo di stampa e il materiale utilizzato.

- Design parametrico: utilizza approcci parametrici per consentire una maggiore flessibilità e personalizzazione del design in base alle esigenze specifiche dell'applicazione.

L'obiettivo principale del DfAM è sfruttare appieno le capacità della stampa 3D per ottenere prodotti migliori, più efficienti dal punto di vista del design, riducendo i costi e i tempi di produzione. Questo approccio è particolarmente utile in settori come l'aerospaziale, l'*automotive*, la medicina e l'industria manifatturiera, dove la personalizzazione, la complessità geometrica e le prestazioni ottimizzate sono fondamentali.

Il *reverse engineering* è il processo di analisi di un oggetto, dispositivo o sistema esistente al fine di comprendere come funziona, come è stato progettato o realizzato. Coinvolge lo studio approfondito di un prodotto per ottenere informazioni dettagliate sul suo funzionamento interno, la struttura, i materiali utilizzati e il processo di produzione. Le fasi principali del *reverse engineering* includono:

- **Acquisizione dei dati:** questa fase coinvolge la raccolta di dati attraverso diverse tecniche, come la scansione 3D, la fotogrammetria, l'analisi dei materiali, l'ingegneria inversa software o hardware, per ottenere informazioni dettagliate sull'oggetto.
- **Analisi:** una volta raccolti i dati, vengono analizzati per comprendere la struttura, il funzionamento interno e le relazioni tra i componenti dell'oggetto. Questa fase può coinvolgere l'uso di software di modellazione 3D, analisi dei materiali e simulazioni per ricreare o comprendere il funzionamento dell'oggetto.
- **Ricostruzione o riproduzione:** basandosi sulle informazioni raccolte e analizzate, si può procedere a ricostruire o replicare l'oggetto. Questa fase può coinvolgere la creazione di modelli 3D, la prototipazione rapida o la produzione di parti o componenti per comprendere meglio il processo o replicare l'oggetto.

Il *reverse engineering* è utilizzato in diverse industrie, come l'ingegneria, il design industriale, l'informatica forense, la produzione e persino la sicurezza informatica. Può essere impiegato per migliorare i prodotti esistenti, capire le migliori pratiche di progettazione, analizzare i prodotti della concorrenza, riparare o sostituire componenti obsoleti e molto altro ancora. Tuttavia, è importante notare che in alcuni casi il *reverse engineering* può incontrare ostacoli legali o etici, specialmente quando coinvolge la violazione di brevetti, segreti commerciali o diritti di proprietà intellettuale. Questo processo è stato utilizzato al fine di dimensionare gli ingombri delle parti della stampante, senza andare a definirla per la sua intera struttura.

5 Percorso progettuale e modellazione

In questo capitolo verranno descritti i passaggi e le scelte compiute in relazione al percorso di progettazione svolto. Ogni paragrafo sarà dedicato ad un aspetto che verrà raccontato tramite testo, sketches, immagini del modello 3D e foto del prototipo realizzato.

5.1 Regolazione del flusso

L'obiettivo fondamentale è garantire la minima presenza di bolle nella resina durante il riempimento e la fase di stampa. Le bolle, come detto precedentemente, si generano durante la preparazione del liquido, quando questo viene agitato per rimettere in sospensione i vari costituenti. Eliminare questa fase non è possibile visto la sua importanza: l'alternativa è quella di contenere le bolle in modo che queste non si riversino nella vaschetta durante il travaso. L'analisi della proposta da Elegoo, descritta nel paragrafo sullo stato dell'arte, è stato il punto di partenza per ipotizzare una soluzione.

Ipotizziamo di avere una bottiglia contenente dell'acqua e chiusa con un tappo. Il nostro scopo è svuotare l'acqua all'interno. Capovolgiamo il contenitore in modo da avere il tappo sotto e togliamolo: l'acqua comincerà a defluire mentre l'aria (all'esterno) cercherà di entrare. Questi due fluidi si incontrano e si scontrano nell'apertura della bottiglia. Ciò genera un flusso discontinuo e vengono a formarsi bolle all'interno del liquido. È possibile svuotare la bottiglia avendo un flusso continuo? Per capire se ciò è possibile sono state condotte delle prove utilizzando una bottiglia contenente dell'acqua e un tappo con due fori (Fig. 5.1). In questa situazione non sembra possibile direzionare il flusso di acqua in un foro e quello dell'aria nell'altro: nell'esperienza fatta (Fig. 5.2) il liquido defluiva indistintamente da entrambe le aperture, alternando la caduta di gocce e la generazione di bolle.

Andando ad osservare l'esperienza dal punto di vista della fisica si può notare come sui fori agiscano due pressioni: la pressione atmosferica (P_{atm}) che "spinge" il liquido dall'esterno verso l'interno della bottiglia e la pressione idrostatica (P_h) che spinge dall'interno per farlo uscire. La pressione atmosferica

ha un valore definito e costante per entrambi i fori, mentre la pressione idrostatica che agisce è pari a

$$P_h = h \cdot g \cdot d$$

dove h è l'altezza della colonna del fluido, g è l'accelerazione di gravità e d è la densità del fluido. Tenendo in considerazione che g ed d sono costanti, P_h agente sui fori è influenzata solo dall'altezza h . I fori posti sul tappo si trovano alla stessa distanza, quindi la P_h agente su entrambi è di uguale intensità, quindi il fluido contenuto spinge in modo equo sui due.

Se uno di questi fori dovesse trovarsi ad una altezza differente rispetto all'altro (Fig. 5.3) si genererebbe una P_h differente tra i due, quindi l'acqua, ci si aspetta, uscirà dal foro più distante dal pelo dell'acqua poiché la P_h agente sarebbe maggiore, mentre sull'altro la P_h sarebbe minore. Il contenitore si svuoterà del fluido contenuto in modo continuo e senza gorgoglii, e continuerebbe in modo costante fino a che non sia terminato il liquido. Seguendo questo ragionamento è stata ripetuta l'esperienza sopra descritta con una modifica al tappo (Fig. 5.4): uno dei due fori presenta una estrusione di 50 mm verso l'interno della bottiglia, così da avere una differente P_h sui due fori e verificare quello che era stato ipotizzato. Il risultato ha dato conferma della ipotesi di poter dedicare i due flussi d'ingresso e d'uscita in modo separato, ma ha anche evidenziato come dal foro dell'aria vi era comunque la generazione di bolle nel liquido che poi salivano verso la superficie (Fig. 5.5).

Nel caso dell'acqua le bolle svaniscono in modo rapido, ma ciò non è detto avvenga nel caso della resina a causa la sua alta viscosità (circa 300 cps) e della tensione superficiale. Per ovviare

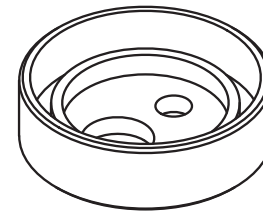


Figura 5.1



Figura 5.2

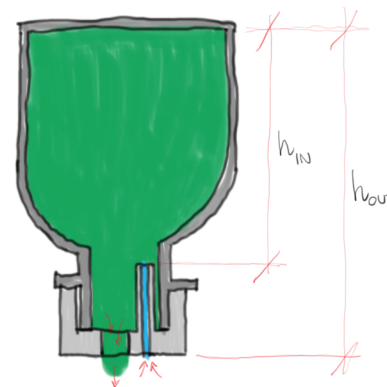


Figura 5.3

per Stevino $P = \rho g h$
 \downarrow
 la $P_{IN} < P_{OUT}$
 \downarrow
 non ci dovrebbe essere
 fuori uscita di fluido
 da IN, così da favorir
 rre solo l'ingresso
 dell'aria

a questa nuova problematica la soluzione è stata di allungare l'estrusione fino a quasi il fondo della bottiglia, così da fare in modo che lo sfiato sia nella zona sopra il pelo del liquido e comunicante con il volume d'aria all'interno del contenitore. In questo modo non verranno generate bolle ulteriori durante l'ingresso dell'aria, mentre quelle già presenti, generate dalla agitazione precedente del contenitore, tenderanno con il passare del tempo a risalire in superficie e svanire. Il liquido che ne uscirà quindi ne avrà una limitata presenza. Quest'ultima descrizione degli avvenimenti verrà verificata con il test del prototipo finale nel capitolo successivo.

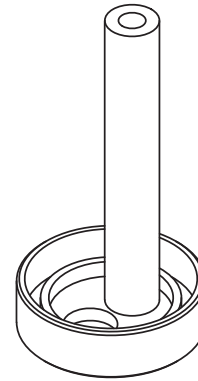


Figura 5.4



Figura 5.5

5.2 Componenti

Il passo successivo è stato quello di definire come e di cosa doveva comporsi questo sistema: se di un serbatoio esterno come per quello di *fhuable*, di un contenitore modellato ad hoc per integrarsi con la stampante come per la FormLabs oppure se sfruttare le stesse bottiglie fornite dai produttori di resine come nel caso di Elegoo. Visto uno dei punti fondanti su cui si basa questo elaborato, ovvero l'adattabilità e disponibilità del sistema per la maggior parte delle stampanti LCD di media e grande taglia, la scelta più corretta è quella di sfruttare i contenitori standard in cui è raccolto il liquido fotopolimerico, così da minimizzare le componenti del sistema. Le altre opzioni risulterebbero troppo influenzate dalla struttura della macchina LCD. Inoltre, grazie ad una rapida analisi condotta tramite i canali della comunità digitale, come Thingiverse, GrabCAD ed altri, è stato possibile notare come la geometria e il dimensionamento del collo e della filettatura di queste bottiglie, per la maggior parte condividono lo stesso standard, per cui i tappi di ognuna possiedono le stesse misure (tipologia di filettatura, passo, diametro). L'opzione di un sistema composto da una chiusura a tappo ed un alloggiamento per questo sulla vaschetta è l'ipotesi più plausibile (Fig. 5.6).

Altro punto cardine del progetto è la semplicità d'uso. Questa si vuole tradurre in piccoli e semplici gesti che aiutino a gestire il processo, migliorando l'esperienza d'utilizzo da parte dell'operatore. Di nuovo l'esempio di Elegoo rappresenta un buon punto di partenza visto la facilità con cui è possibile attivare il processo di riempimento. Avendo in mente ciò, i passaggi che il tecnico operatore dovrebbe compiere per poter mettere in opera il sistema di riempimento sono i seguenti:

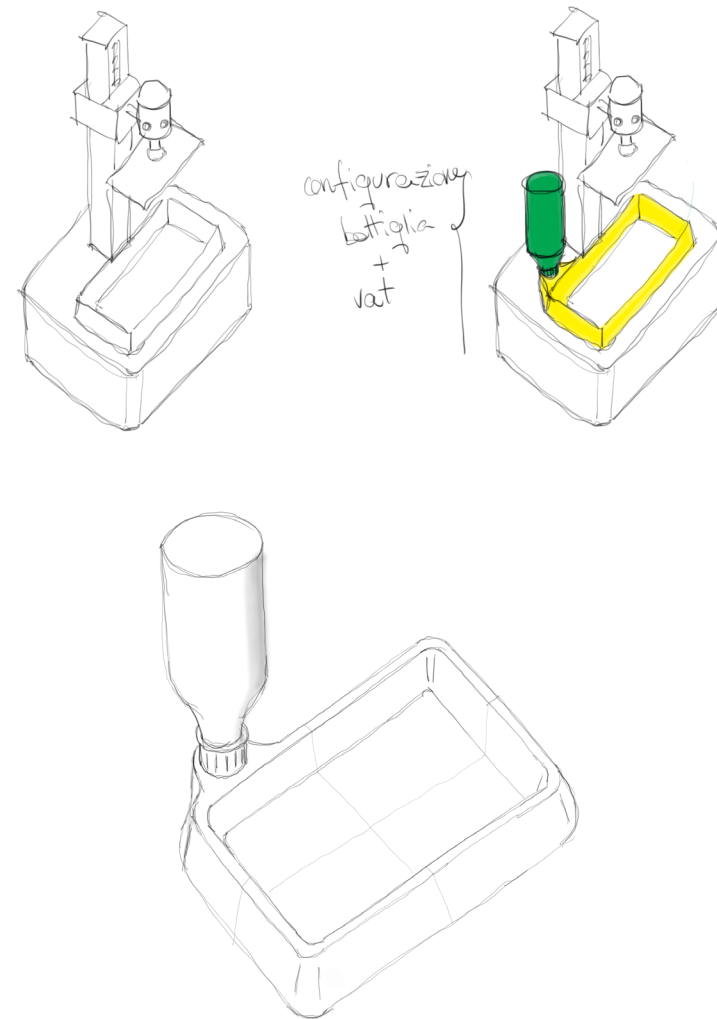


Figura 5.6

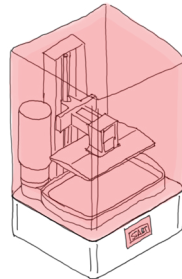
1. Al primo utilizzo della resina, sostituire il tappo fornito dal produttore con quello del sistema di riempimento automatico.



3. Capovolgere la bottiglia e aspettare qualche secondo che la soluzione all'interno si stabilizzi un minimo, favorendo alla maggior parte delle bolle di portarsi in alto.



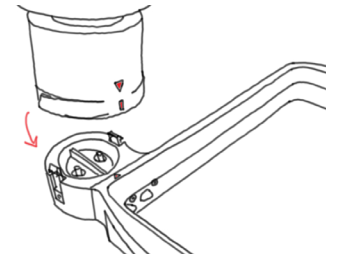
5. Il sistema può rimanere all'interno durante tutto il processo di stampa, mantenendo in modo automatico il livello corretto di resina.



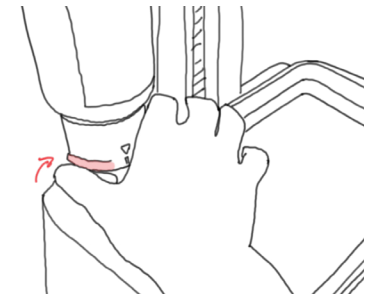
2. Agitare la bottiglia contenente il liquido fotopolimerico per rimettere in sospensione i costituenti.



4. Inserire la bottiglia nell'apposito incastro nella vaschetta per attivare il processo di riempimento fino a livello.



6. Per rimuovere la bottiglia sarà necessario rilasciare il sistema di aggancio e si potrà riporre la bottiglia con il tappo senza doverlo sostituire con quello standard fornito dal produttore.



Avendo definito nel complesso le parti e come queste potrebbero interagire tra loro, nel paragrafo seguente si affronterà il sistema di chiusura e apertura presente all'interno del tappo per garantire il corretto funzionamento.

5.3 Sistemi di chiusura

Un sistema di valvole che possa garantire la tenuta e, all'occorrenza, aprirsi è stato fin da subito oggetto di analisi e studio. Le possibilità e varianti che esistono nel mondo da cui si può prendere ispirazione sono molteplici. Di seguito si affronterà il percorso che ha portato alla realizzazione completa di questo sistema.

5.3.1 Valvola con testa conica

Tramite sketches sono state considerate le prime ipotesi di geometria per la valvola, in relazione alla funzione di tenuta, movimento e sicurezza. La prima versione è simmetrica radialmente (Fig. 5.7), ha il corpo cilindrico e una testa conica. La parte terminale è caratterizzata da una battuta che assicura l'incastro tramite uno spessore che mantiene chiusa in sicurezza la valvola. Quando necessario si rimuove lo spessore, così da permettere il movimento al corpo della valvola. Le valvole sono poste nel tappo: vi sono due fori svasati passanti nella parte piana che rappresentano la sede della testa conica. Il corpo di questa attraversa il tappo verso l'esterno. Il movimento verticale permette alla valvola di chiudere o aprire i fori. Il tappo e le valvole è possibile stamparli già assemblati (*print in place*). Analizzando gli sketches (Fig. 5.8) sono emersi dei problemi riguardanti il mantenimento della corretta posizione durante il movimento e la sicurezza della tenuta la realizzazione di questi componenti tramite FFF. Inoltre la chiusura è assicurata dallo spessore solo se inserito, non assicurando la tenuta della valvola durante la fase di attacco e stacco alla vaschetta. Si è passato quindi a pensare ad un altro design per il corpo e la testa della valvola.

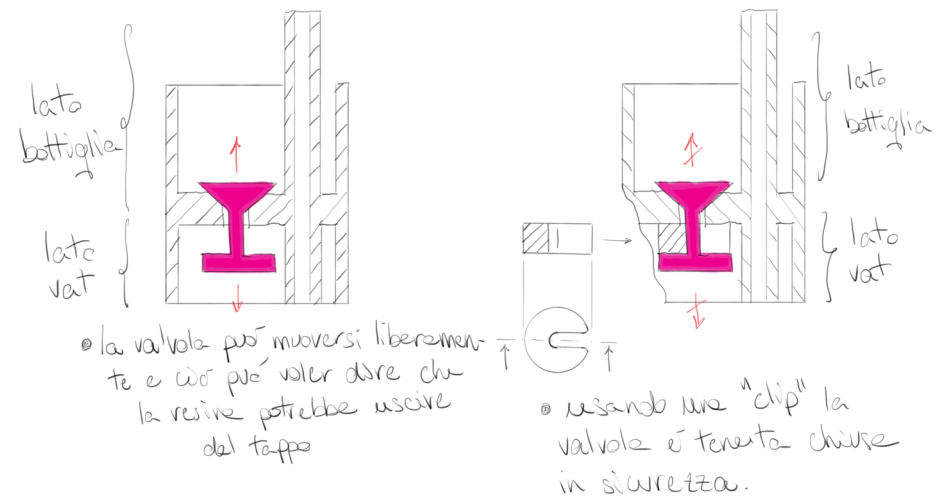


Figura 5.7



Figura 5.8

5.3.2 Valvola con testa a calotta

Questa seconda tipologia di valvola è caratterizzata da una geometria differente per testa e corpo (Fig. 5.9): la testa è stata pensata per poter mantenere la tenuta anche se la valvola dovesse posizionarsi in modo non perpendicolare al piano del tappo; il corpo ha l'obiettivo di garantire un effetto elastico che mantenga sempre chiusa la valvola andando a sfruttare la geometria e l'elasticità del materiale. Anche i fori hanno cambiato forma per permettere un corretto posizionamento delle valvole.

La posizione della valvola è sempre chiusa, grazie alla forza che agisce tramite la deformazione del corpo che spinge verso l'esterno del tappo. Quando il tappo viene inserito nell'apposito alloggiamento nella vaschetta, verrà a contatto con un'appendice che sporge e spinge la valvola verso l'alto, aprendo il passaggio: se il contatto viene a mancare tra questi due il sistema torna a chiudersi autonomamente. Questo stato "basso" della valvola avviene anche grazie all'inclinazione con cui sono progettate le pareti interne della sede del corpo valvola, così da favorire la direzione verso il basso.

Com'è possibile notare dagli sketches la testa e il corpo sono stampati separati per poi essere uniti una volta assemblati con il tappo. La necessità è dovuta dalla particolare geometria del corpo che deve potersi deformare senza rompere e per garantire maggiore resistenza lungo la direzione verticale è richiesto che questo sia stampato in orizzontale. Questo è un vincolo proprio delle tecnologie AM, in particolare FFF, poiché le componenti così realizzate risultano essere più resistenti lungo le direzioni del piano della sezione, piuttosto che lungo la direzione verticale dei layer.

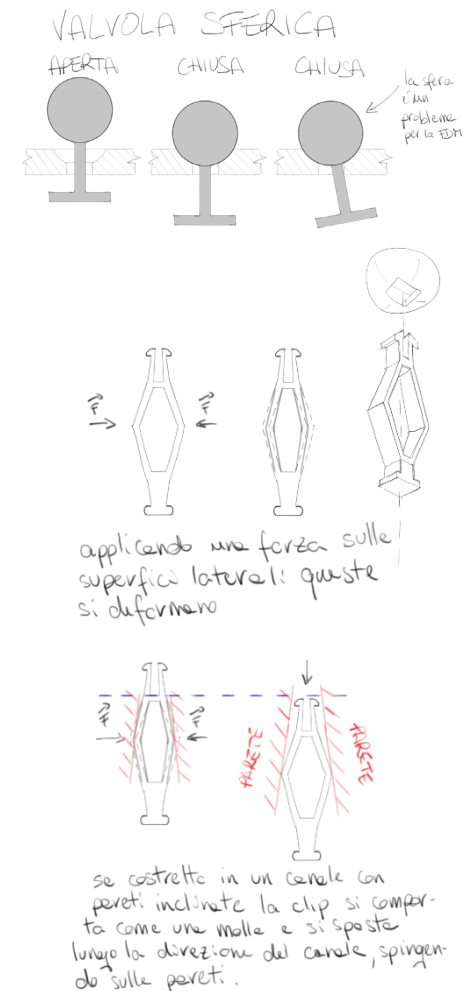


Figura 5.9

La prototipazione di questa versione non ha dato i risultati sperati a causa di due fattori: la perdita di liquido dai fori nonostante la chiusura della valvola; l'apertura della valvola rimaneva incastrata senza tornare nella posizione chiusa. Le motivazioni perciò sono da ricercare nuovamente nella tecnologia scelta per stampare le componenti e nella forza d'attrito troppo elevata per poter permettere al corpo di tornare nella posizione bassa.

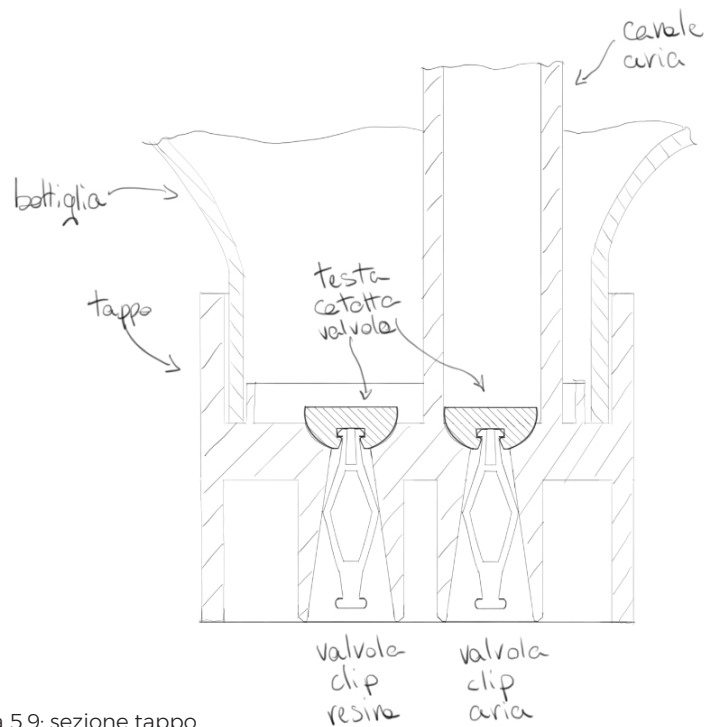


Figura 5.9: sezione tappo

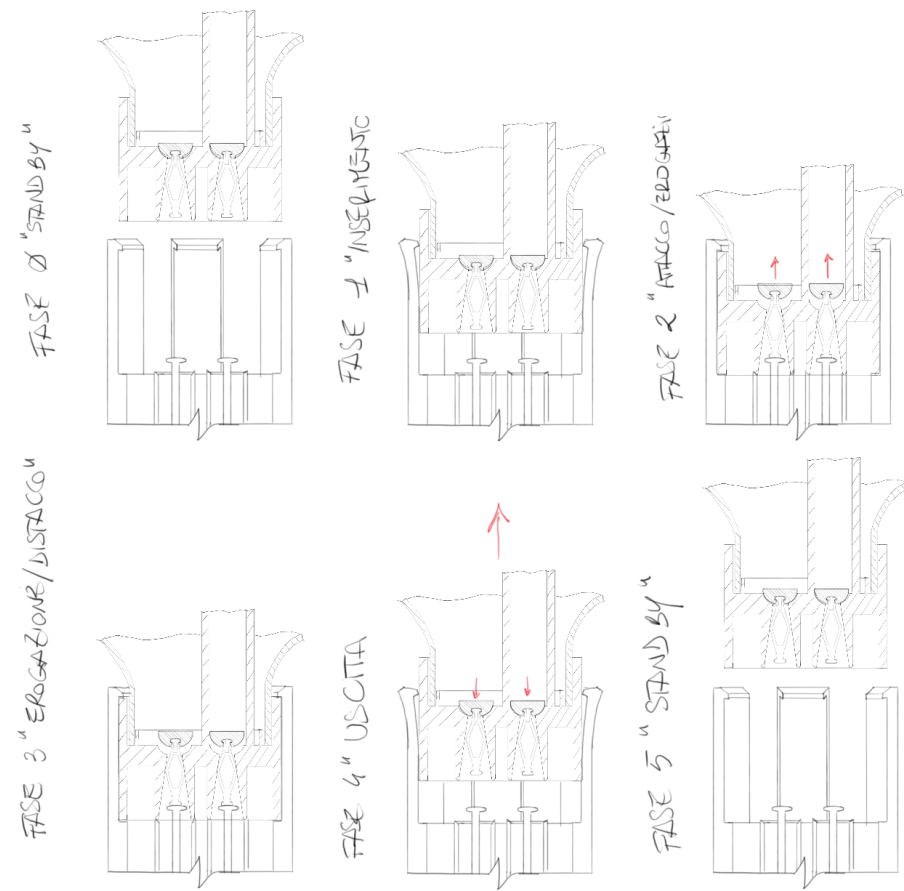


Figura 5.9: rappresentazione dell'attacco e del distacco

5.3.3 Valvola ad incastro

Nella terza alternativa, l'ispirazione proviene dai sistemi di chiusura dei lavandini e lavabi: nello specifico quei tappi che permettono la chiusura dello scolo spingendo verso il basso e di apertura verso l'alto, mediante un incastro tra il corpo inferiore del tappo e la sede in cui questo scorre.

Il design così sviluppato (Fig. 5.10) non ha però soddisfatto alcuni parametri e vincoli necessari alla sua realizzazione e alla sicurezza, per cui l'ipotesi è stata abbandonata.

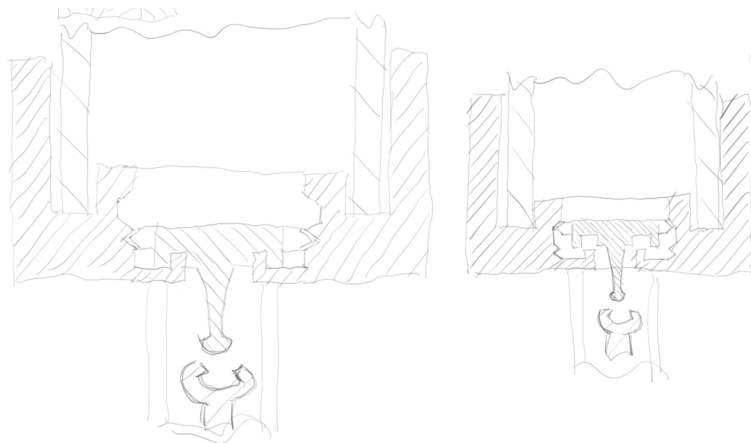


Figura 5.10: dettaglio sezione tappo

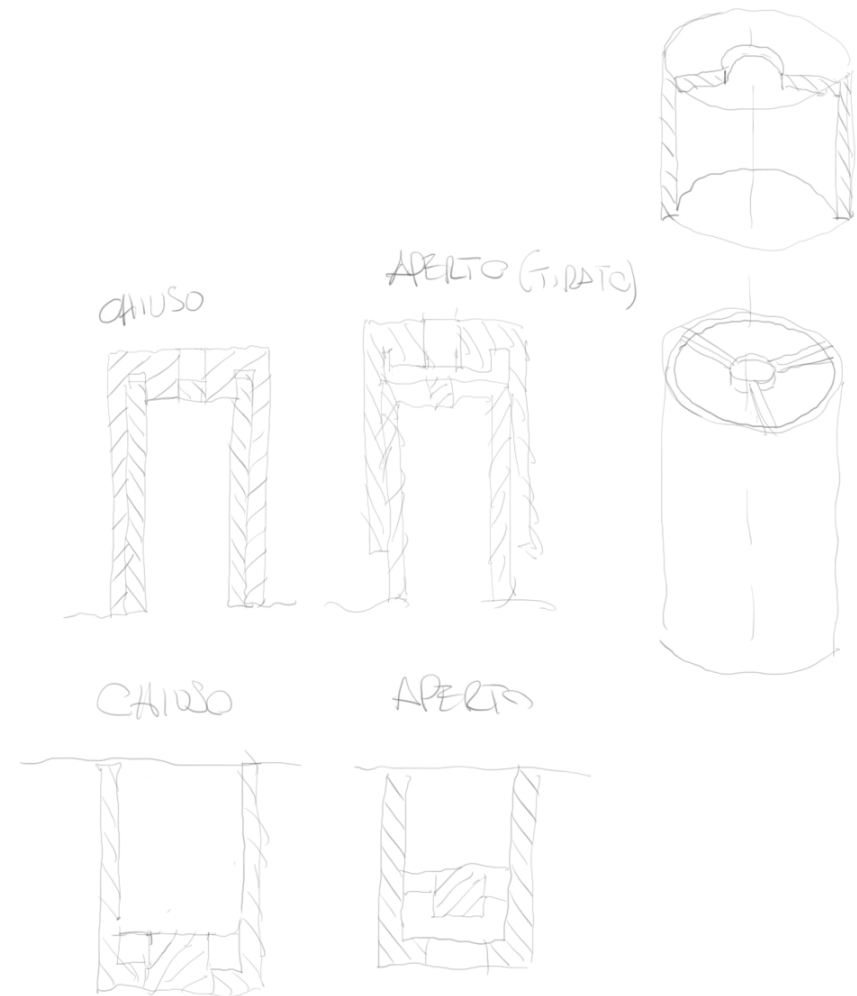


Figura 5.10

5.3.4 Valvola con guarnizione

Visto i vincoli e i limiti della stampa FFF è stato deciso di fare utilizzo di componenti esterne. Ciò ha permesso di rivedere alcune ipotesi che riguardano una geometria semplice (Fig. 5.11), con l'ausilio di molle e guarnizioni.

La testa della valvola presenta uno scavo che è sede di una guarnizione ad anello che andrà a sigillare l'intorno del foro, così da garantire la tenuta (Fig. 5.12). Il foro è stato modellato in modo da permettere il libero movimento della valvola e il suo corretto riposizionamento. All'interno della cavità è posta la molla che spinge sulla testa della valvola.

I risultati ottenuti da questa soluzione sono stati subito positivi: le uniche perdite sporadiche provengono dai bordi di giunzione tra le componenti e la causa è la non omogeneità e dalla presenza di imperfezioni della superficie piana dovuta dalla FFF.

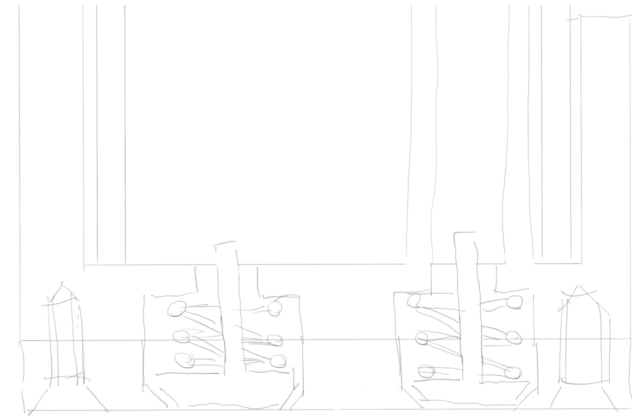


Figura 5.11

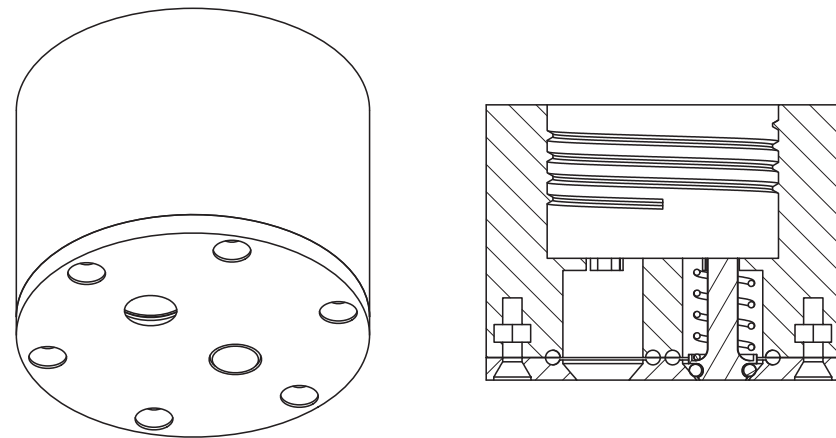


Figura 5.12

5.4 Vaschetta

Per ciò che concerne la vaschetta sono state considerate due opzioni: la prima riguarda un sistema di aggancio che non fosse integrato con la vaschetta, ma rimovibile; l'altra ipotesi prevede una completa integrazione con la vaschetta, quindi una rivisitazione progettuale di questa. La scelta è ricaduta su quest'ultima poiché la prima presentava delle criticità riguardo la sicurezza della bottiglia (rischio cadute) e come questa venga fissata alla cornice della vaschetta. La rivisitazione della vaschetta porta con se alcune considerazioni, positive e negative:

- per usufruire del sistema di riempimento automatico vi è la necessità di realizzare la vaschetta apposita per interno.
- le stampanti LCD hanno dimensioni del piatto differente, quindi anche le vaschette saranno diverse.
- il design della vaschetta deve soddisfare e rientrare nelle possibilità di realizzazione tramite macchine AM.
- il costo della singola vaschetta, realizzata tramite AM, è più basso del costo di una nuova realizzata con i metodi convenzionali.
- è possibile realizzare più vaschette, così da dedicarne una per ogni tipologia di resina usata, evitando di drenarla per ogni cambio colore o materiale.

In commercio vi sono dei *tank* che sfruttano alcuni di questi principi e sono proposte dalla FormLabs e dalla Elegoo per alcuni modelli di stampanti. Quelli della Elegoo (Fig. 5.13) sono



Figura 5.13: vaschette in PA66 e fibra di vetro della Elegoo

realizzati in PA66 e fibra di vetro e la pellicola trasparente è già pre-installata e pre-tensionata.

La riprogettazione della vaschetta si è concentrata soprattutto sulla modalità di rilascio della resina (Fig. 5.14), i canali di uscita ed ingresso, e poi sulla modalità di aggancio del tappo che verrà trattato nel paragrafo successivo. Per ciò che riguarda il sistema di montaggio della pellicola trasparente alla cornice è stato deciso di lasciare la stessa metodologia usata nelle versioni standard.

Il nodo centrale della progettazione è capire come permettere alla resina di fluire e riempire la vaschetta fino al livello ottimale (circa 10 mm dal fondo) e poi arrestare il flusso e mantenerlo fino al termine del processo di stampa. Per fare ciò è stata presa ispirazione dai dispenser automatici di acqua realizzati per gli uccelli: questi sfruttano lo stesso principio descritto nei prodotti del paragrafo dello stato dell'arte. Nel caso dell'elaborato sono stati praticati due canali (Fig. 5.15) che si sviluppano dentro la cornice ed escono sull'interno della vaschetta, terminando con degli sfiati posti ad altezze differenti (Fig. 5.16): quello della resina è posto a 5 mm dal fondo, mentre quello dell'aria a 10 mm. Così facendo il flusso del liquido si interromperà appena il livello nella vaschetta andrà a raggiungere lo sfiato dell'aria, creando un tappo che fermerà il passaggio di aria dentro la bottiglia e quindi la resina. Appena il livello scenderà di nuovo, lo sfiato verrà scoperto e il processo di riempimenti riprenderà fino a fermarsi nuovamente.

Il risultato ottenuto è stato positivo con il prototipo così realizzato: il processo di riempimento è avvenuto in modo continuo e senza interruzioni e fino al raggiungimento del livello impostato. Al raggiungimento di questo il flusso è diminuito fino a essere

interrotto completamente. È stato lasciato il sistema in questo stato per più di 12 ore per testare la sua tenuta e controllare che non ci fossero perdite che avessero fatto salire ulteriormente il livello: il test non ha mostrato variazioni.

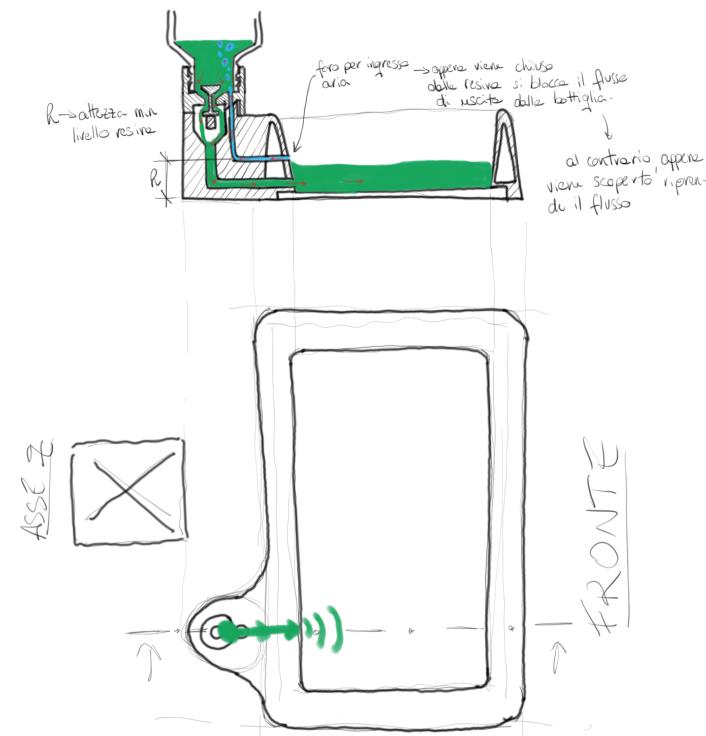


Figura 5.14

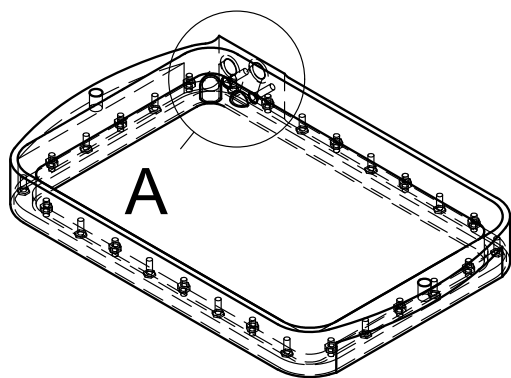
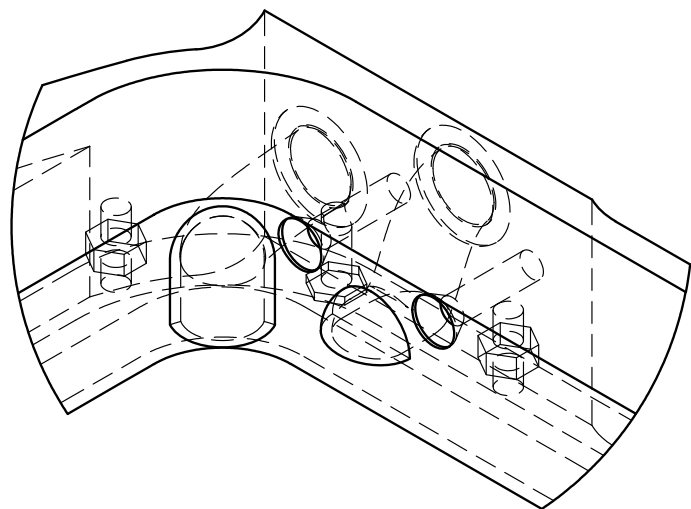


Figura 5.14: dettaglio canali

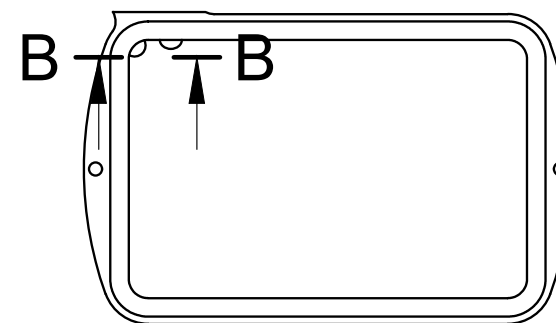
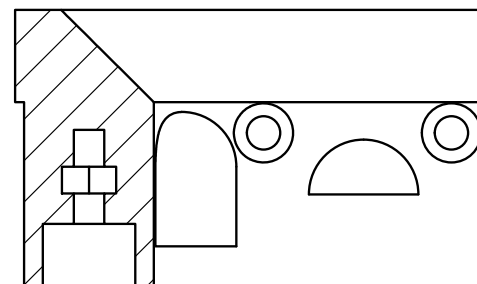


Figura 5.16: dettaglio sezione

5.5 Sistema di aggancio

L'ultima fase di progettazione è stata concentrata su quale sistema di aggancio progettare per assicurare il tappo alla vaschetta, garantendo tenuta e facilità d'uso. L'ispirazione data dalle fibbie in plastica (Fig. 5.19), proprie degli zaini e marsupi, che provvedono ad una forte e sicura tenuta insieme a dei gesti semplici ed efficaci per l'attacco ed il rilascio.

Le prime ipotesi, come si può notare dagli sketches (Fig. 5.20) e dai relativi prototipi, sono risultate sufficienti per assicurare la bottiglia e il tappo nella posizione corretta, ma non permettevano una facile interazione a causa delle dimensioni ridotte. Queste misure sono necessarie a causa del poco spazio disponibile.

Per risolvere questa criticità sono state realizzate delle appendici esterne (Fig. 5.20), direttamente attaccate al tappo, per facilitare l'attivazione del distacco e procedere così in modo rapido. Oltre a ciò permettono di individuare facilmente la posizione corretta di dove andare a premere.



Figura 5.19

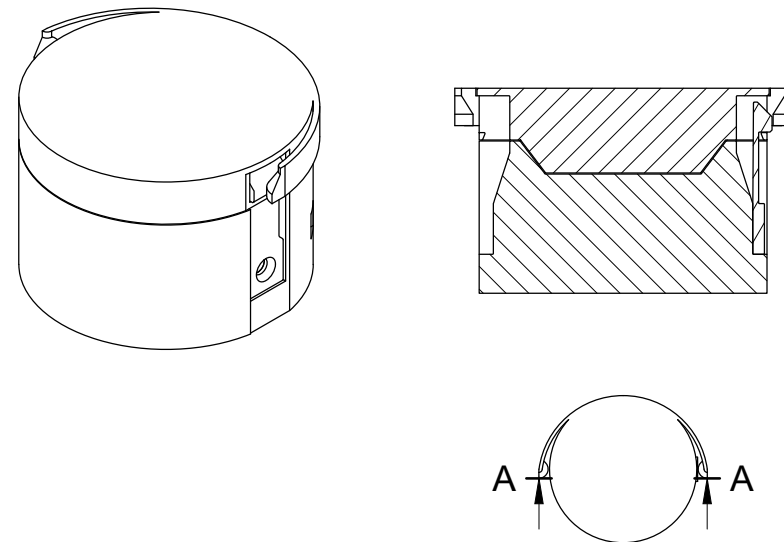
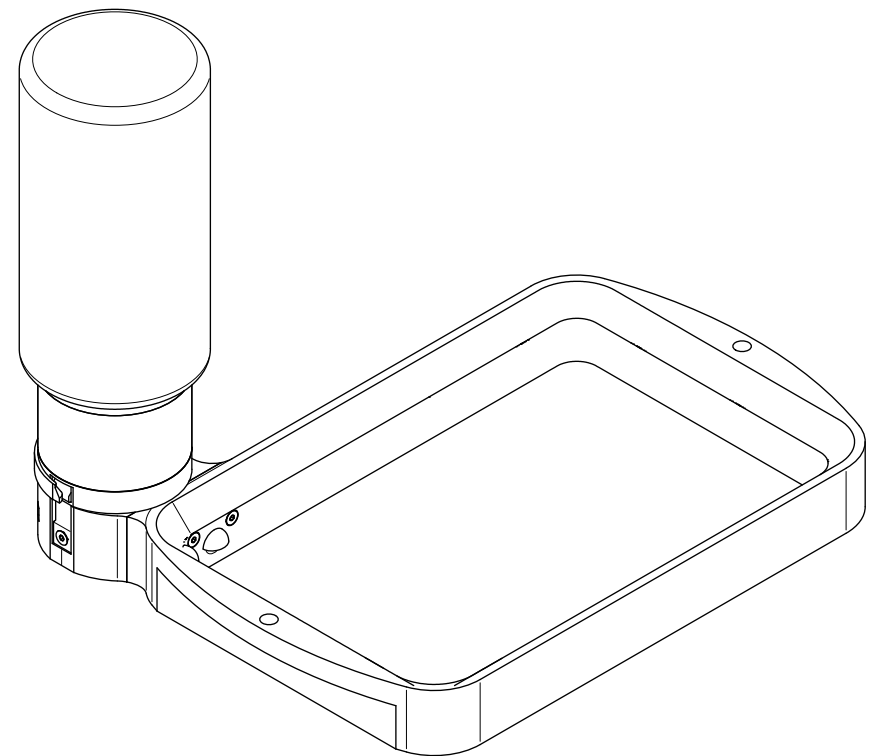


Figura 5.20

6 Prototipazione

Il percorso di progettazione è terminato con la prototipazione delle parti precedentemente descritte, assemblandole e testandone il sistema così ipotizzato. È stata posta attenzione al processo di montaggio, alla sicurezza dei sistemi di fissaggio con cui viene eseguito e alla integrazione con la macchina LCD presa in considerazione, oltre al corretto funzionamento dei componenti. Per necessità di realizzazione tramite FFF, il design della vaschetta è stato alterato rispetto alle considerazioni fatte in precedenza, separando la cornice principale dal sistema di attacco affinché questi potessero essere stampati singolarmente. Il sistema è formato dalla vaschetta e dal tappo. Questi due corpi principali sono composti da singoli elementi: cornici di fissaggio per la pellicola trasparente; cornice esterna della vaschetta; corpo della vaschetta per attacco; corpo del tappo per distacco; corpo del tappo filettato, guarnizioni, bulloni M3, molle a compressione.

Nei test compiuti sono stati utilizzati diversi liquidi per analizzarne il comportamento e simulare le caratteristiche proprie della resina fotopolimerica, prima del test definitivo con quest'ultima. Nello specifico sono stati impiegati acqua e sciroppo d'acero. L'uso dell'acqua è risultato essere un modo con il qual avere i primi riscontri in modo rapido, aspettandosi comunque risultati non pienamente attendibili viste alcune caratteristiche e comportamenti differenti dal liquido fotopolimerico, come la viscosità ed il peso molecolare. L'acqua è stata utile per testare il comportamento dei flussi dei primi prototipi e per la tenuta della vaschetta. Lo sciroppo d'acero invece è risultato un'ottima alternativa per simulare il comportamento viscoso della resina dato che condivide lo stesso valore (circa 300 cps). La descrizione dei test ed i loro esiti sono descritti nel capitolo successivo.



La stampante a filo utilizzata per la realizzazione dei prototipi è una Snapmaker J1 con doppio estrusore indipendente (IDEX). Il materiale plastico utilizzato è il PET-G della Treed e della Sunlu. La scelta di questo materiale polimerico è avvenuta per le sue buone proprietà fisico-chimiche e per la sua sostenibilità. I parametri della stampante sono stati impostati nel modo seguente:

**ALTEZZA
LAYER** 0.21 mm

N° 4
PERIMETRI (~1.2 mm)

LAYER 6
SOLIDI (~1.2 mm)

TIPOLOGIA Adaptive
RIEMPIMENTO cubic

**DENSITÀ
RIEMPIMENTO** 30 %

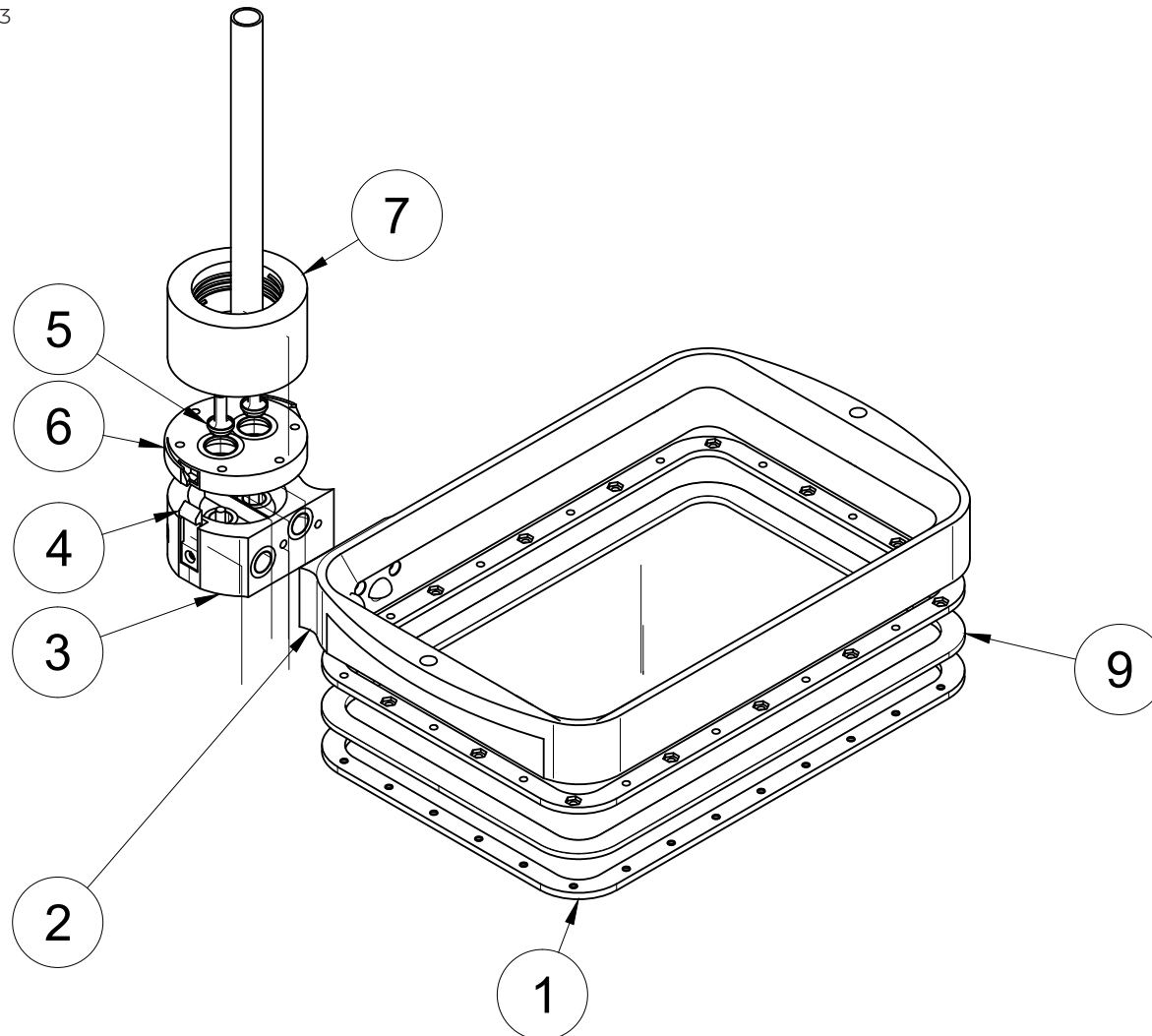
**VELOCITÀ
PERIMETRI** 70 mm/s

**SPESSORE
LINEA** 0.4 mm

**SOVRAPPOSIZIONE
ESTRUSIONE** 30 %
(~0.132 mm)

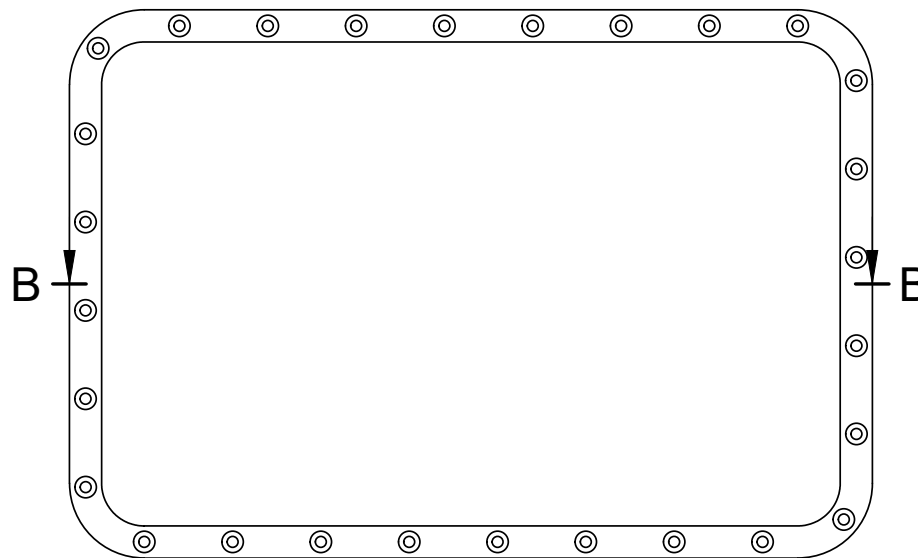
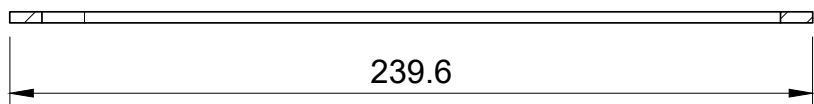
6.1 Tavole tecniche

Scala 1:3

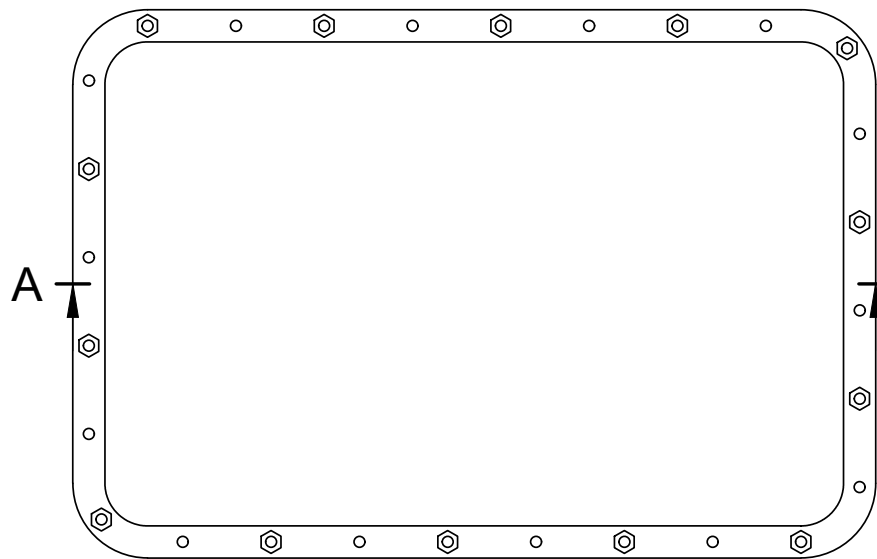


Elenco parti	
elemento	numero parte
1	Vaschetta_tank_frammes
2	Vaschetta_tank
3	Vaschetta_attacco
4	Vaschetta_attacco_fibbia
5	Valvola con guarnizione
6	Tappo_attacco
7	Tappo_bottiglia
9	FEP

A-A (1:2)



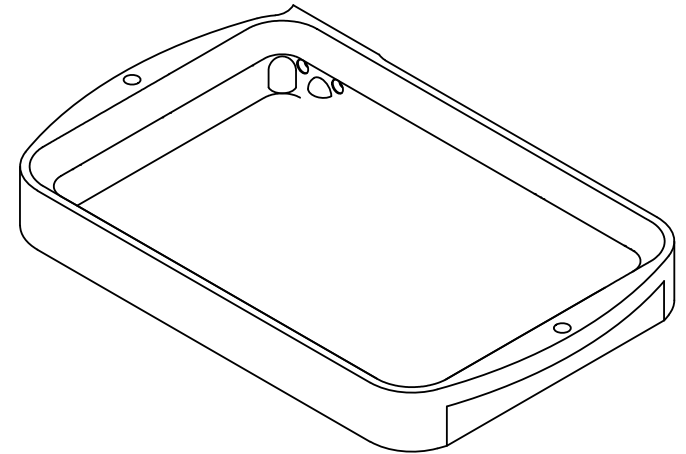
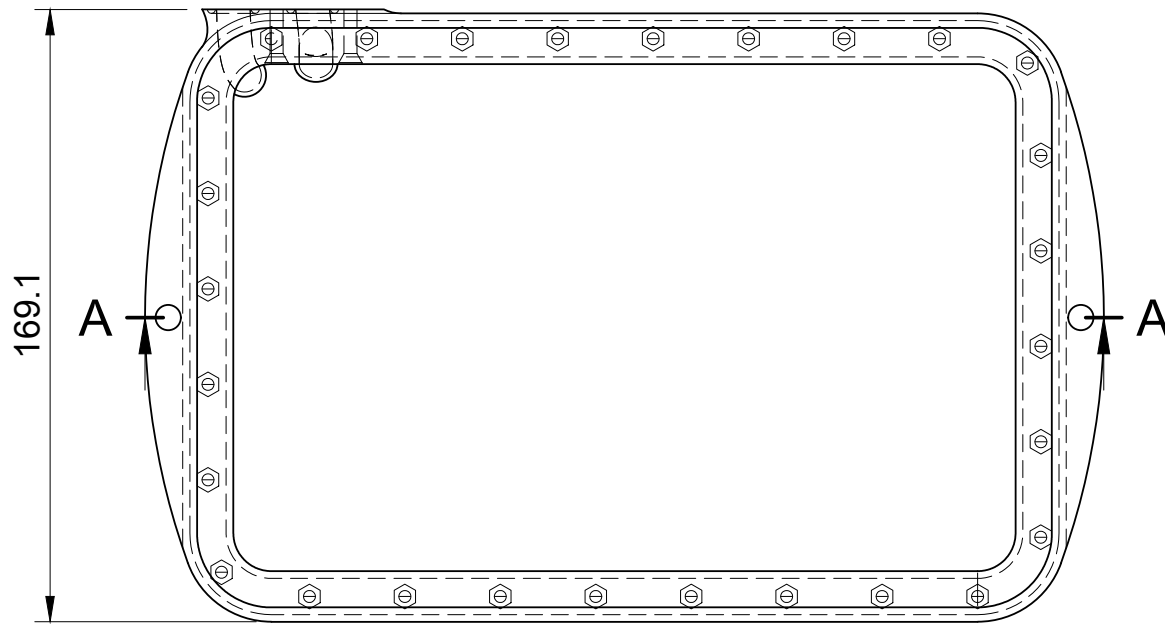
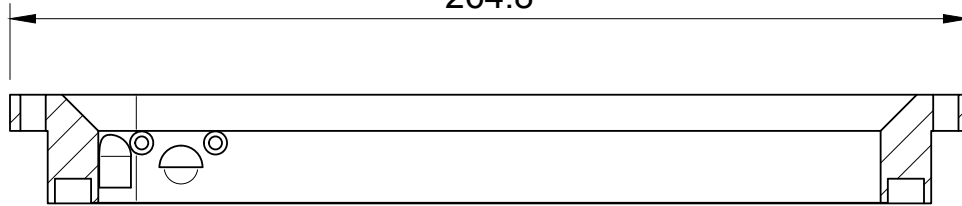
B-B (1:2)

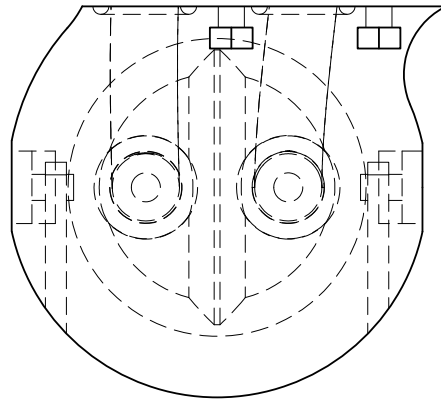


Elemento 2: scala 1:2

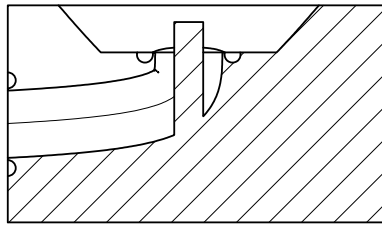
A-A (1:2)

264.8

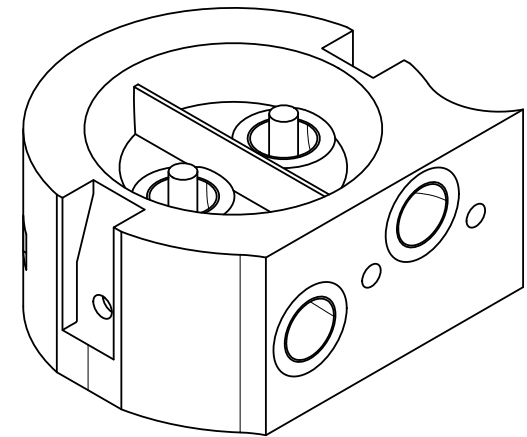
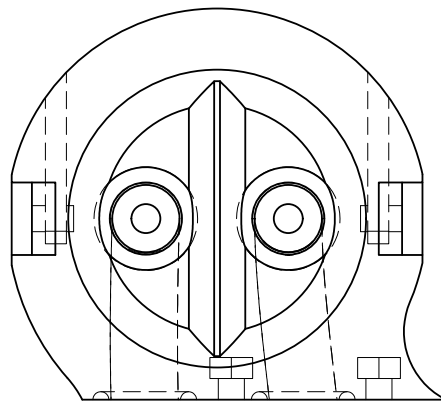
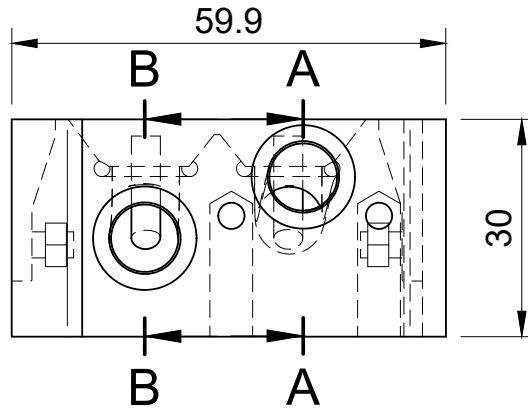
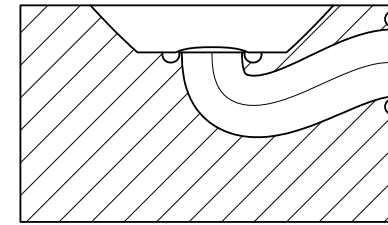




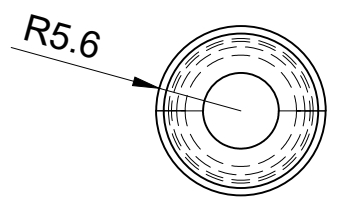
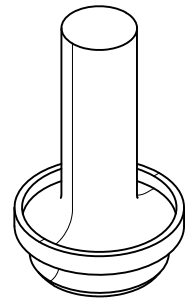
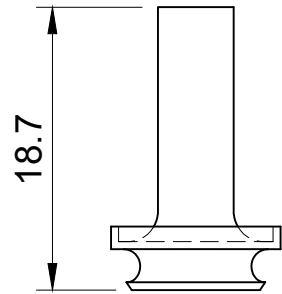
B-B (1:1)



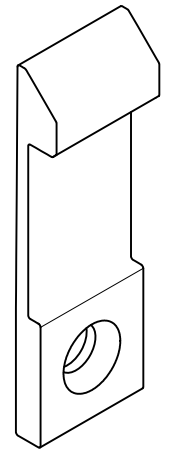
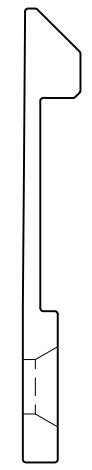
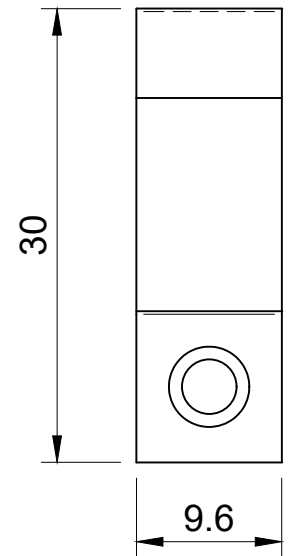
A-A (1:1)



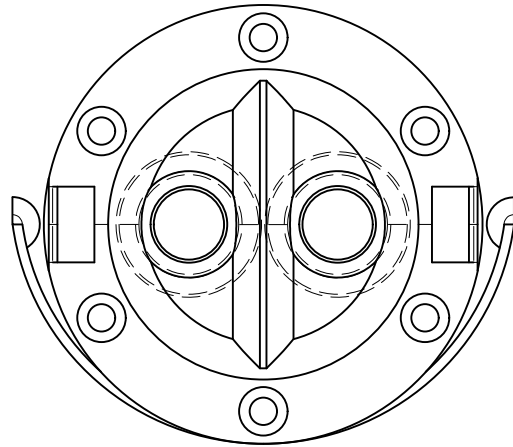
Elemento 4: scala 2:1



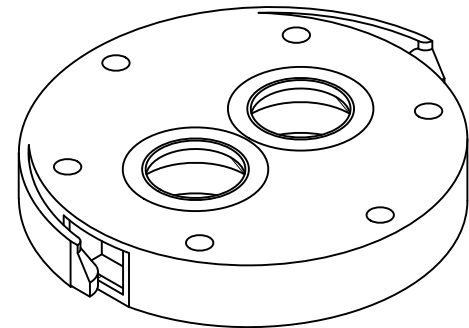
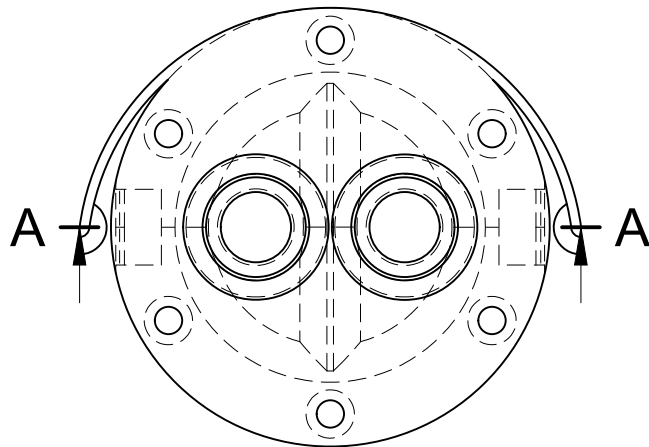
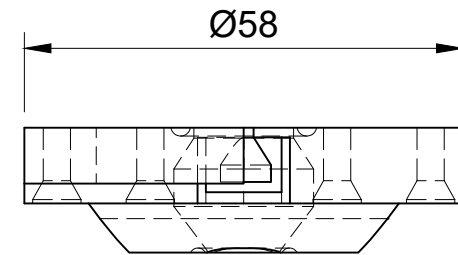
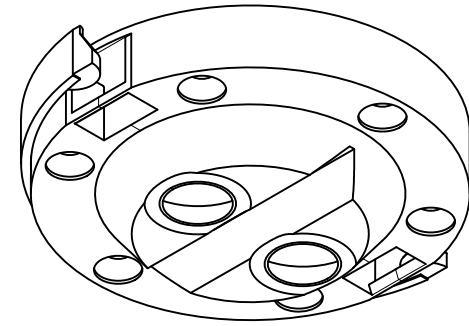
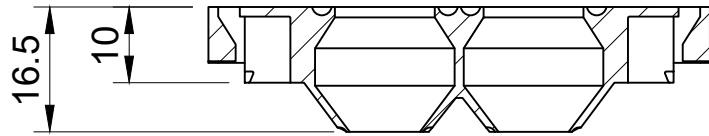
Elemento 5: scala 2:1



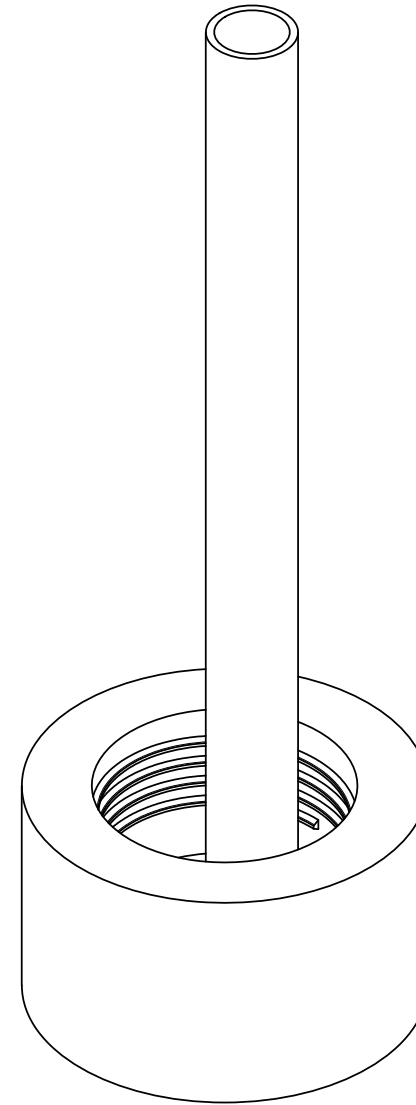
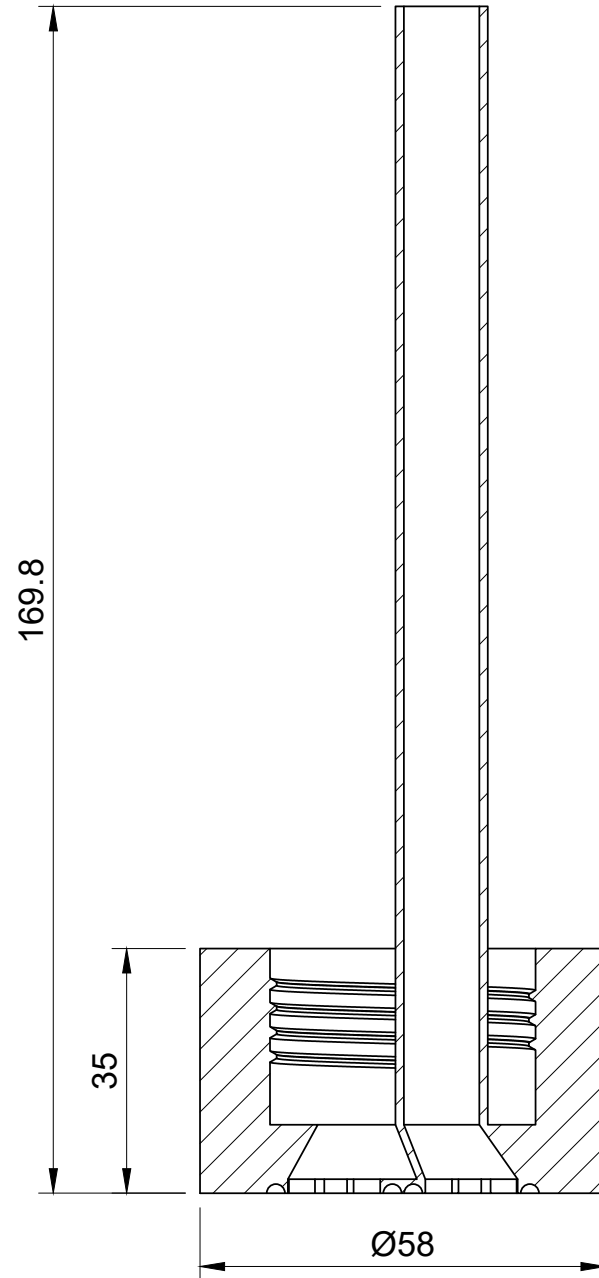
Elemento 6: scala 1:1



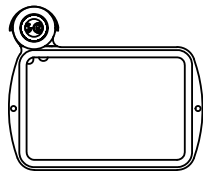
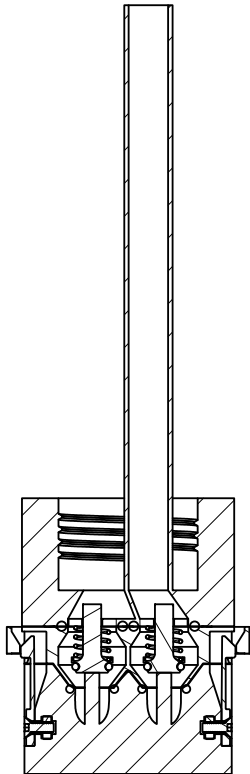
A-A (1:1)



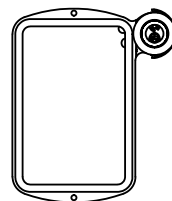
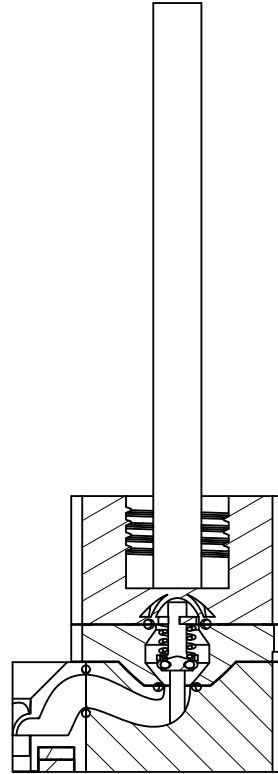
Elemento 7: scala 1:1



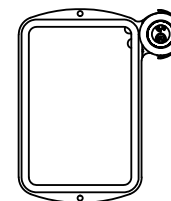
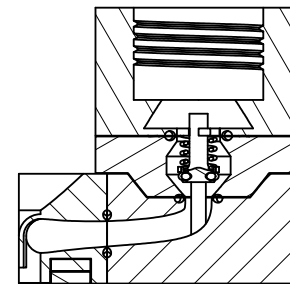
A-A (1:2)



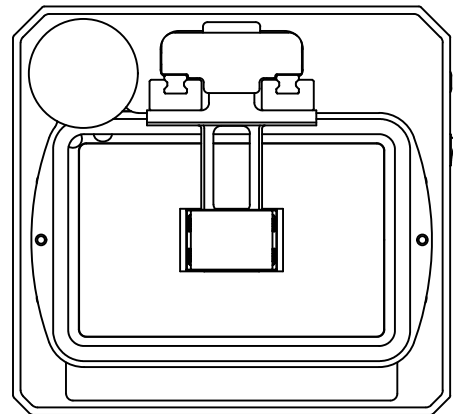
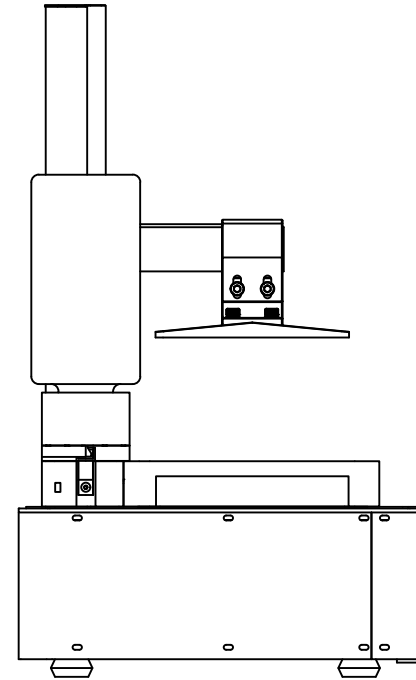
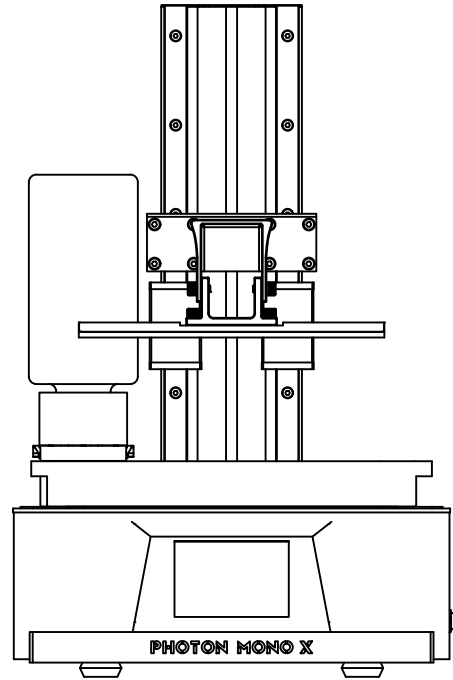
B-B (1:2)



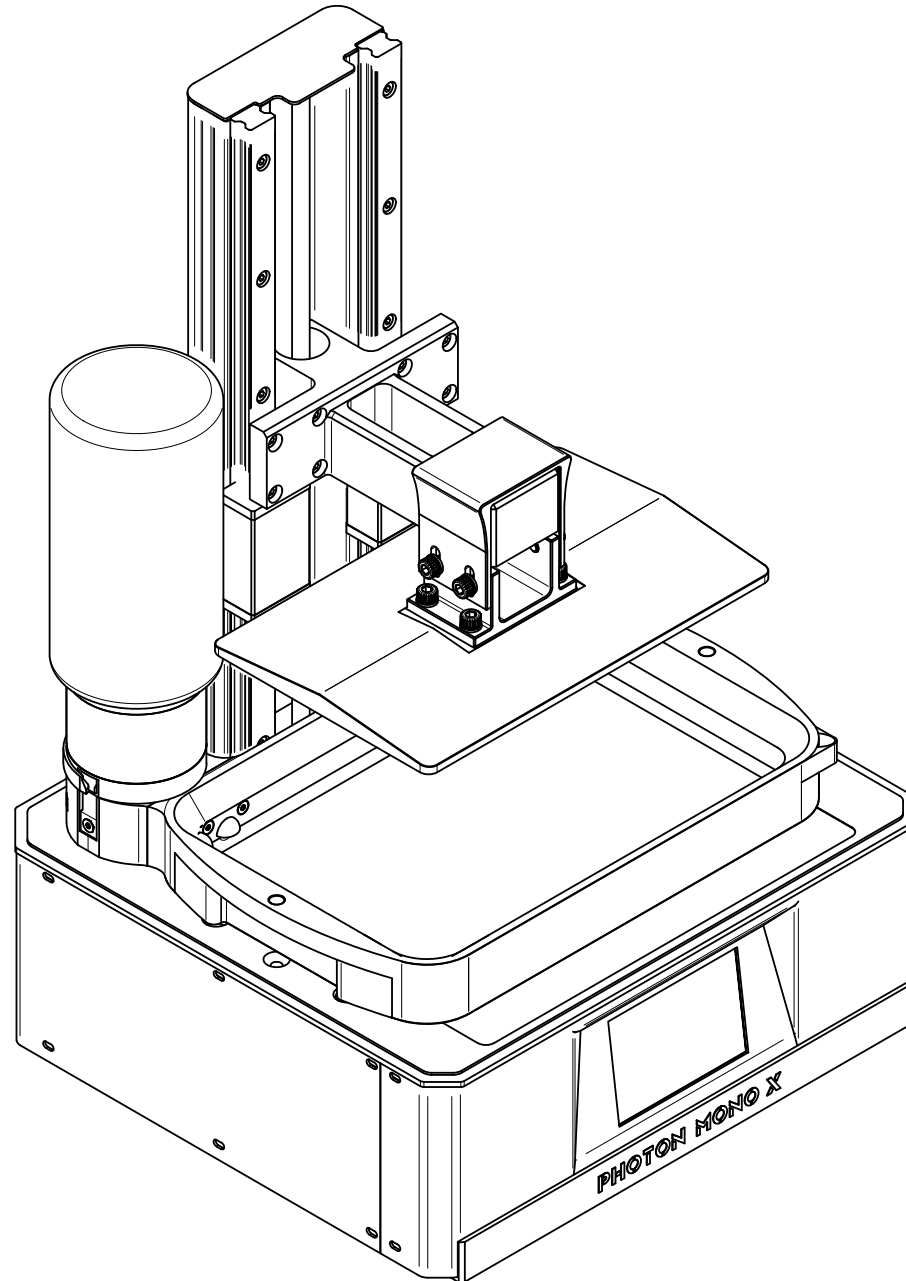
C-C (1:2)



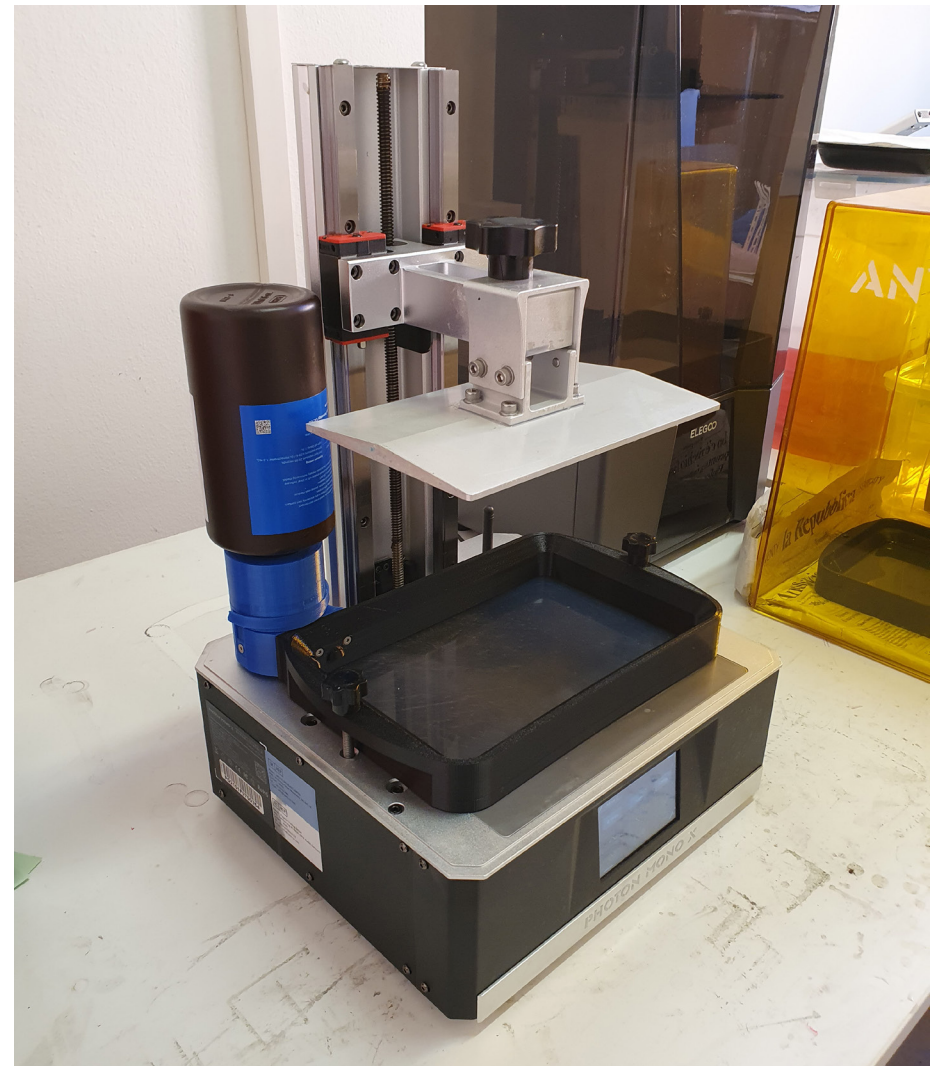
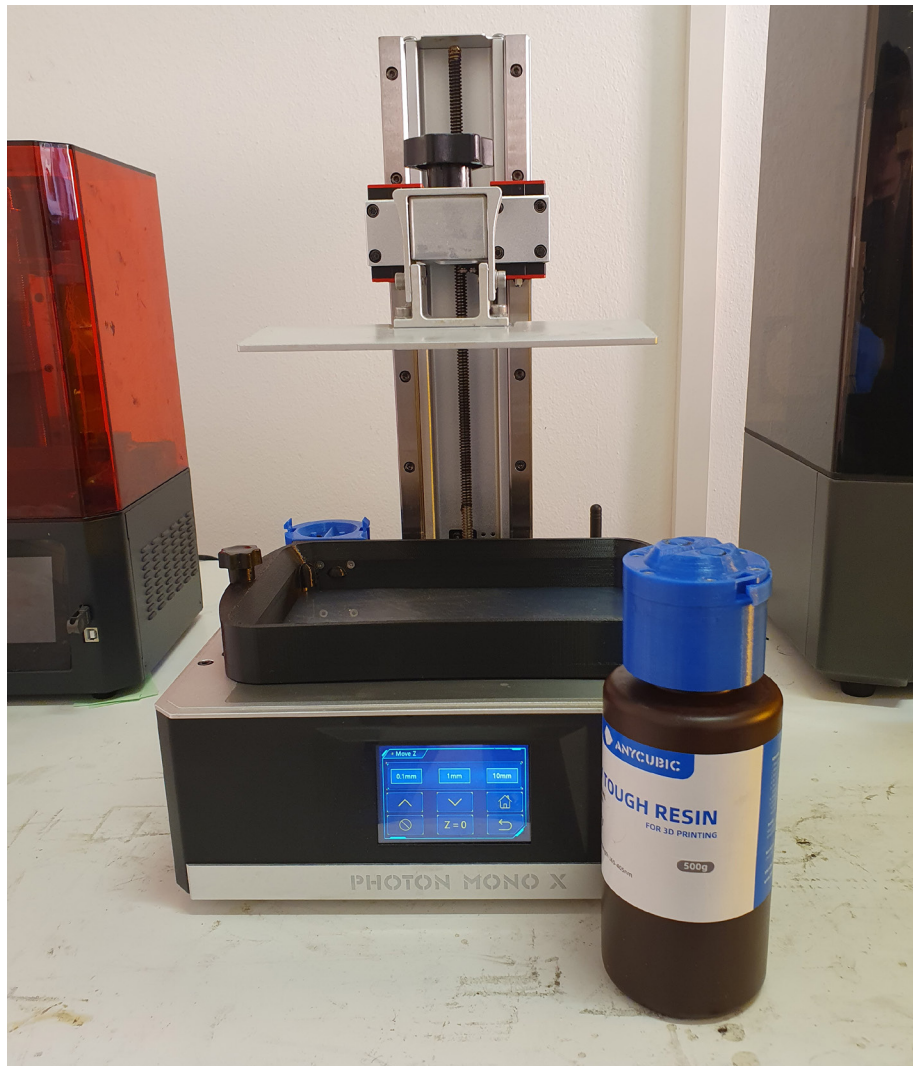
Assieme: scala 1:5

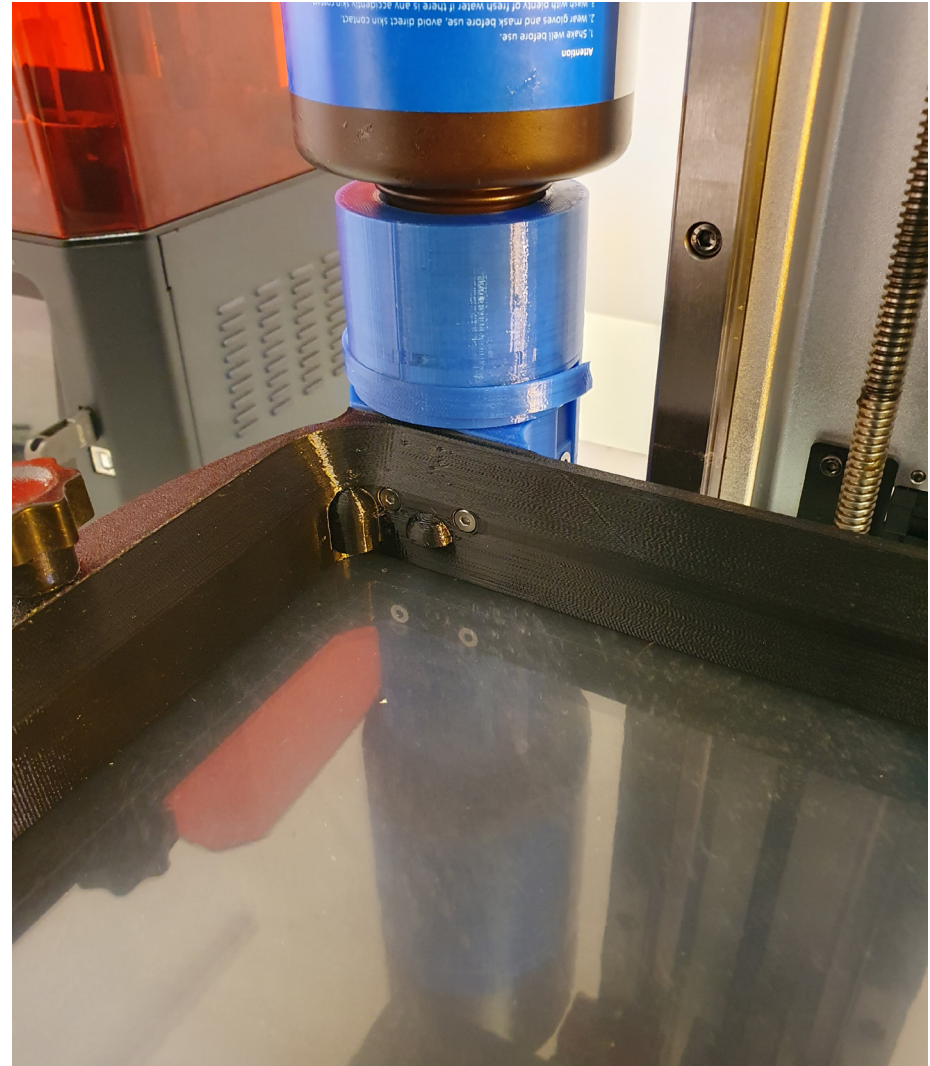


Assonometria: scala 1:3



6.2 Prototipi





7 Risultati

I test condotti sul sistema prototipato sono stati compiuti con l'uso dell'acqua e dello sciroppo d'acero.

Durante il primo test è stato importante capire quale fosse il comportamento del liquido con il sistema realizzato. Dopo aver riempito la bottiglia con l'acqua, è stata capovolta e inserita nell'apposita sede della vaschetta posta dentro una bacinella per contenere il fluido uscente.

Si può notare dalle immagini, l'acqua ha percorso il canale dedicato (Fig- 7.1b) in modo continuo mentre l'aria risaliva all'interno della bottiglia dallo sfiato adiacente. Dopo circa 30 secondi il flusso ha cominciato a rallentare fino ad arrestarsi

completamente visto l'innalzamento del livello del liquido che ha ostacolato il flusso dell'aria entrante: l'acqua ha raggiunto la quota prefissata (Fig. 7.1c). Sono state notate anche delle perdite provenienti dalle varie intercapedini, dovute dal processo di stampa FFF e dalla grandezza delle molecole d'acqua. Queste erano state già considerate nel processo di progettazione ed il test ha avuto lo scopo di verificare la funzionalità del sistema nonostante queste perdite. A questo punto è stato attivato il sistema di sgancio del tappo (Fig. 7.1d) per controllare che non vi fossero perdite ulteriori durante la fase di distacco e questo non si è verificato. È stato notato che entrambe le sedi



Figura 7.1a: inserimento



Figura 7.1b: riempimento



Figura 7.1c: livello raggiunto

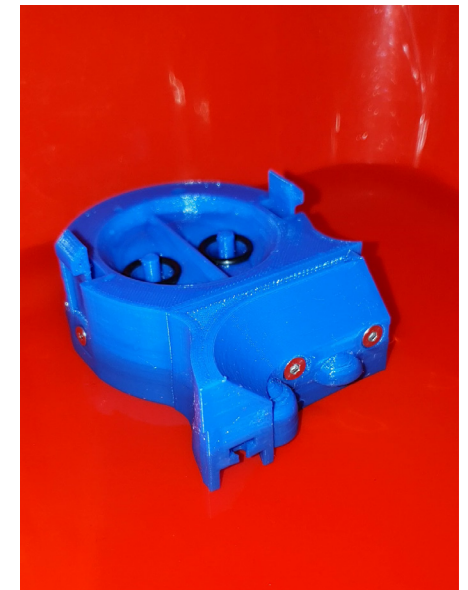


Figura 7.1d: distacco

per il corretto posizionamento del tappo erano piene d'acqua: questo è stato causato probabilmente dall'apertura della valvola prima ancora che questa fosse a contatto con il foro nella vaschetta e determinando l'uscita del liquido. La bottiglia è stata riposizionata nuovamente sulla vaschetta. È stato lasciato il sistema per circa 12 ore per controllare che non vi siano alterazioni nell'altezza del liquido raggiunta così da dimostrare l'efficacia o meno del prototipo. Il livello è rimasto inalterato per tutto il tempo validando così l'efficacia del sistema, nonostante le perdite durante il processo di riempimento.

Il secondo test è stato svolto allo stesso modo con l'uso dello

sciropo d'acero al posto dell'acqua. L'uso di questo liquido è per simulare il comportamento viscoso della resina nei confronti del sistema, così da analizzare i risultati ottenuti. Al momento della fuoriuscita dello sciroppo è subito stata evidente la presenza di bollicine all'interno di questo (Fig. 7.2a), generate dalla precedente agitazione per simulare il processo di riempimento che l'operatore compirebbe come se fosse la resina fotopolimerica. Le bolle rimangono all'interno del liquido (Fig. 7.2b-c) a causa della sua alta viscosità e tensione superficiale, ma il lento riempimento permette alle bolle di andare in superficie. Oltre a ciò si è notato un flusso più lento,

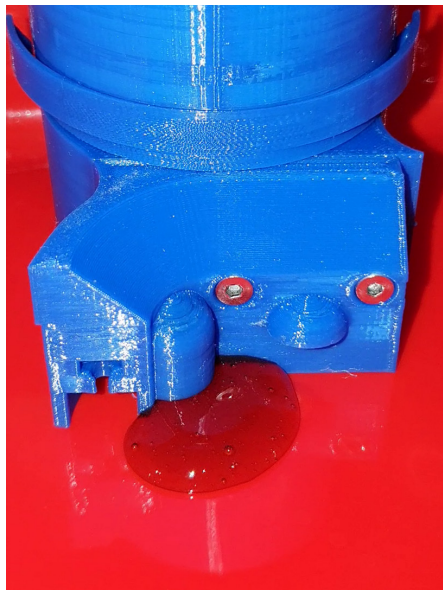


Figura 7.2a: riempimento 0%

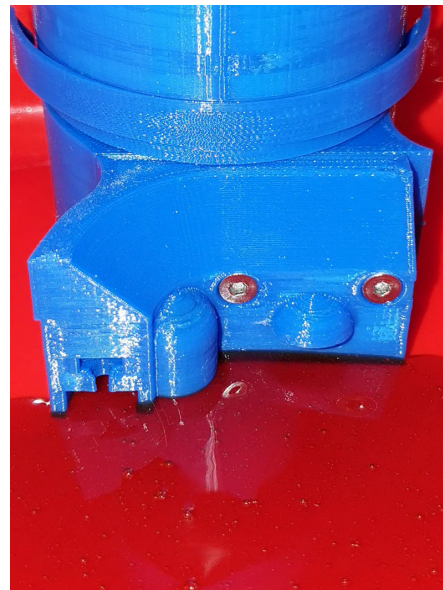


Figura 7.2b: riempimento 50%

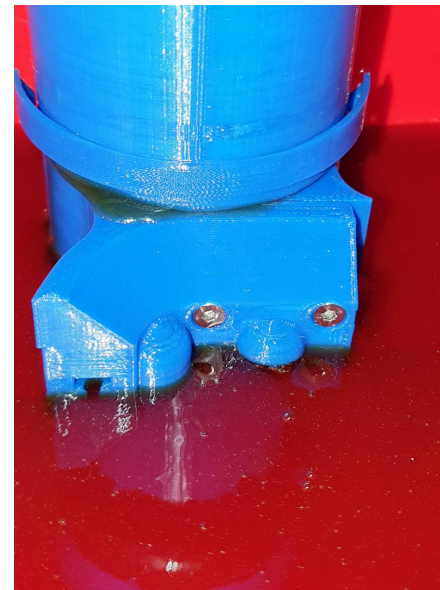


Figura 7.2c: riempimento 100%

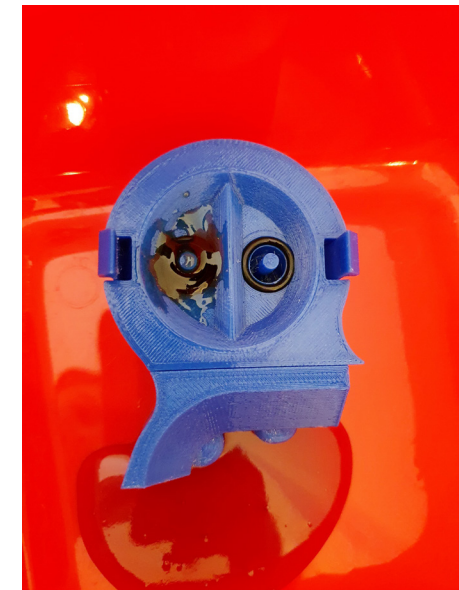


Figura 7.2d: dettaglio sedi valvole

causato dall'alta viscosità, che ha raggiunto il livello prefissato in circa 4 minuti. Per il resto della simulazione il comportamento è stato analogo a quello osservato con l'acqua: si sono verificate meno perdite poiché le molecole dello sciroppo sono molto più grandi di quelle dell'acqua e quindi hanno meno spazio per passare fra le giunzioni delle componenti.

Il terzo test condotto con la resina fotopolimerica della Elegoo ha seguito la stessa metodologia di osservazione e analisi: durante il processo di riempimento (Fig. 7.3a-b) non sono state notate significative differenze con l'esperienza descritta in precedenza con lo sciroppo. Il flusso in uscita è risultato più lento dello

sciropo d'acero, perciò il tempo di riempimento è raddoppiato a circa 8 minuti. La presenza di bolle alla fine del riempimento è risultata minima (Fig. 7.5) rispetto al caso in cui la resina è stata versata direttamente dalla bottiglia nella vaschetta (Fig. 7.4)

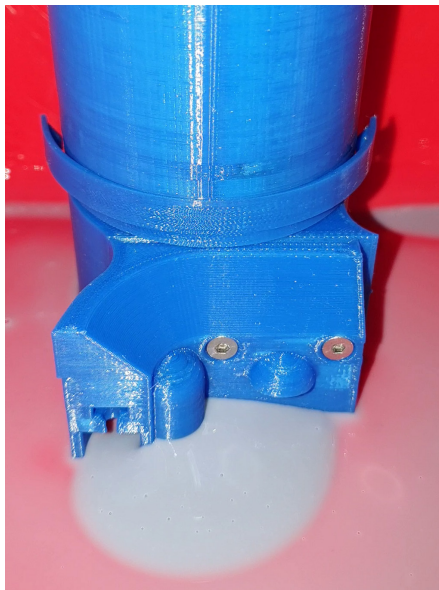


Figura 7.3a: riempimento 0%

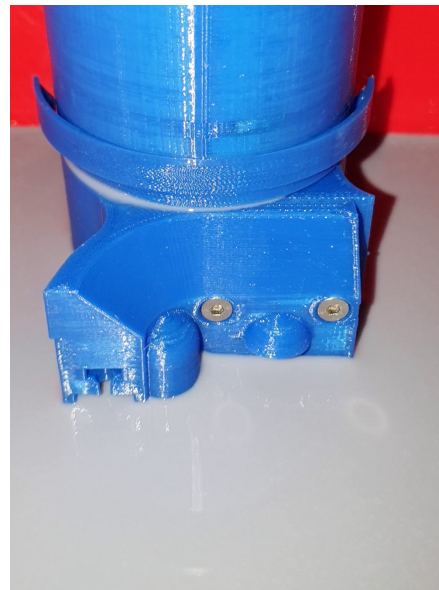


Figura 7.3b: riempimento 50%



Figura 7.4



Figura 7.5

8 Discussione

I dati e le osservazioni raccolte durante le prove eseguite hanno confermato alcune ipotesi e ne hanno confutate altre. Tenendo conto delle limitazioni poste dalla realizzazione delle componenti tramite FFF, è emerso come l'ipotesi di utilizzare due canali dedicati per i flussi di aria e liquido sia un metodo efficace per permettere il riempimento della vaschetta evitando la formazione di ulteriori bolle nel liquido, come avviene nei prodotti attualmente esistenti in commercio. Risulta anche efficiente il processo automatico di mantenimento del livello. Le prove eseguite sulla stampante LCD Anycubic (Fig. 8.1), per verificare gli ingombri e la correttezza delle posizioni (Fig. 8.2), ha evidenziato come la semplice gestualità derivata dal sistema di aggancio e sgancio renda rapide queste fasi (Fig. 8.3), ma con difficoltà iniziali nel posizionamento del tappo nell'incastro. Ciò è causato da un design degli elementi di snap poco efficaci e perciò necessiterebbero di una ulteriore analisi per ottenere una geometria delle parti che faciliti l'inserimento. Inoltre è risultato che, quando la bottiglia si trova in posizione di attacco, dei movimenti accidentali potrebbero attivare il meccanismo di distacco: di nuovo la causa è da ricercare nella geometria delle linguette di attacco e per garantire una maggiore sicurezza sarebbe necessario testarle ulteriormente per ottenere la forma ottimale.



Figura 8.1

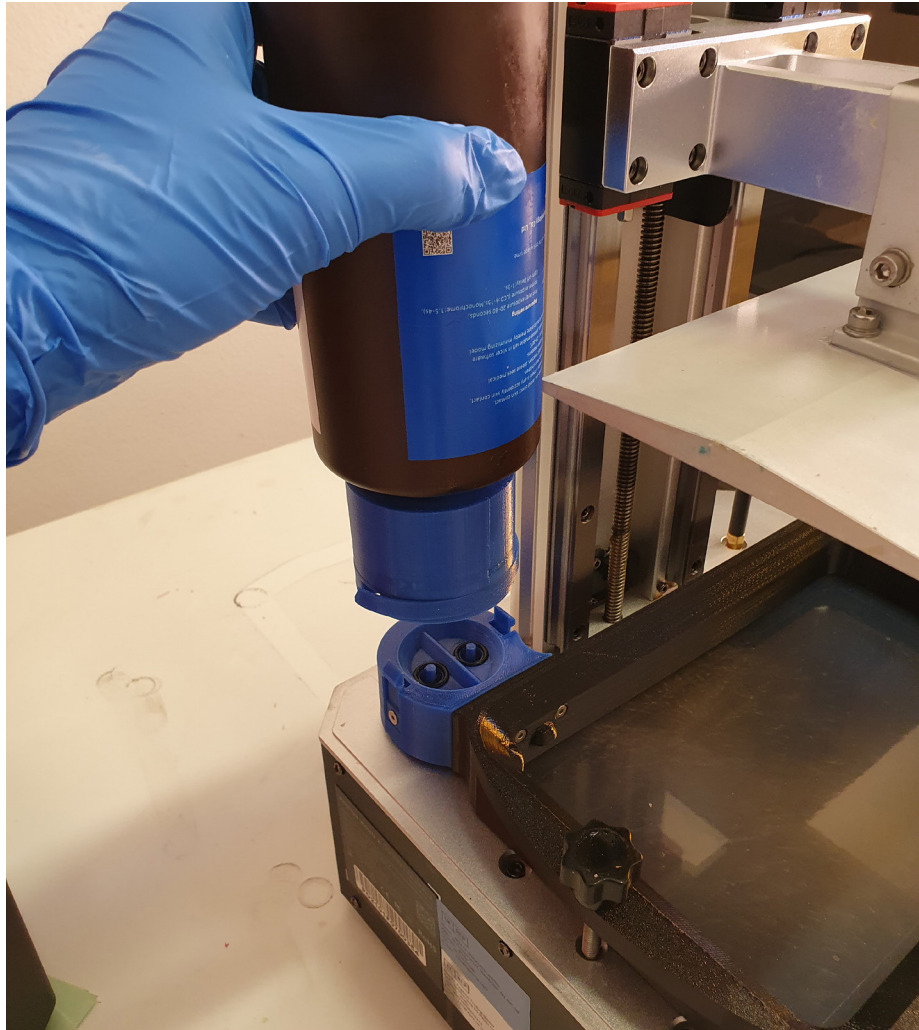


Figura 8.2
74



Figura 8.3

Dall'osservazione dell'esperienza fatta con l'impiego della resina, la presenza di bollicine nel liquido che si riversa nella vaschetta sembra inevitabile: sicuramente il sistema per come è stato ipotizzato aiuta a limitare la presenza di queste. Il lento fluire del liquido fotopolimerico inoltre aiuta questo effetto limitante poiché, per la descrizione del flusso laminare (Fig. 8.6), le bolle che saranno più vicine alle pareti percepiranno un moto ancora più lento visto la bassa velocità della resina e quindi potrebbero rimanere all'interno della bottiglia o del canale di uscita. Questa affermazione sarebbe da confermare con uno studio ed analisi mirate e approfondite. Infine il tempo totale affinché la vaschetta si riempia concede alle bollicine riversatesi nel *tank* di svanire.

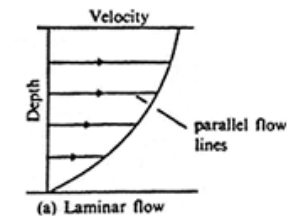


Figura 8.6: grafico del flusso laminare: sulle ascisse la velocità, mentre sulle ordinate la profondità

9 Conclusioni

Nel complesso il sistema risulta essere una proposta valida come punto di partenza per progettare un sistema per il riempimento automatico con il potenziale miglioramento della qualità di stampa. Uno studio ancora più specifico, dettagliato e l'uso di altre tecnologie AM per la realizzazione delle componenti, che tenga conto di tutti gli aspetti progettuali, potrà sicuramente raggiungere dei risultati più efficienti che renderanno il sistema sicuro e funzionale. Si potrà quindi raggiungere un livello di attendibilità più alto per le prove così effettuate e validare così il sistema ipotizzato.

Oltre al perfezionamento delle varie componenti, come nel caso delle linguette snap, il sistema potrebbe evolversi ulteriormente nelle caratteristiche e nell'uso che se ne può fare:

- modularità del sistema
- possibilità di stoccaggio della vaschetta contenente la resina
- personalizzazione del sistema
- miglioramento del drenaggio

Ringraziamenti

Vorrei ringraziare in primis la mia famiglia: mio padre per l'esperienza trasmessa, mia madre per il supporto dato e mia sorella per offrirmi sempre un punto di vista differente. Vorrei ringraziare i vecchi amici per essere sempre presenti e i nuovi amici per le nuove esperienze condivise insieme. Vorrei ringraziare i professori, in particolare Ing. Mattia Mele per avermi seguito con entusiasmo.

Federico Pietro Colleoni

Bibliografia

Bandyopadhyay, A., & Bose, S. (2019). *Additive Manufacturing, Second edition*. CRC Press.

Cao, L., Lü, L., Liu, X., Zhang, J., Jiang, T., Tu, C., & Chen, B. (2023). Waiting time prediction for bottom-up vat photopolymerization. *Additive Manufacturing*, 74, 103693. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2023.103693>

Chao, W., & Liao, Y. (2023). Cost-effective recycled resin for digital light processing 3D printing. *Journal of Cleaner Production*, 388, 136013. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136013>

Etimm, Baldassarre, F., & Ricciardi, F. (2017). The additive manufacturing in the industry 4.0 era: the case of an Italian FabLab. *Journal of Emerging Trends in Marketing and Management*, 1(1), 105-115. http://www.etimm.ase.ro/RePEc/aes/jetimm/2017/ETIMM_V01_2017_89.pdf

Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., & Khorasani, M. (2020). *Additive Manufacturing Technologies*. Springer Nature.

Hopmann, C., & Schmitz, M. (2021). *Plastics Industry 4.0: Potentials and Applications in Plastics Technology*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG. Izdebska-Podsiadły, J. (2022). *Polymers for 3D printing: Methods, Properties, and Characteristics*. William Andrew.

Kumar, S. (2020). *Additive manufacturing processes*. Springer Nature.

Pandey, J. K., Manna, S., & Patel, R. K. (2022). *3D printing technology for water treatment applications*. Elsevier.

Redwood, B., Schöffner, F., & Garret, B. (2018). *The 3D printing handbook: Technologies, Design and Applications*.

Zhang, H., & Zhao, X. (2022). In-situ thermal monitoring informed modeling and simulation of process temperature during vat photopolymerization additive manufacturing. *Materials Today: Proceedings*, 70, 237-241. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.09.027>

Sitografia

DPrintBeginner. (2022, May 19). Anycubic Photon M3 Max Review: Who needs FDM anymore?

| 3D print Beginner. *3D Print Beginner*.

<https://3dprintbeginner.com/anycubic-photon-m3-max-review/>

Gehrke, F. (2021, April 20). *Elegoo Mars 2 Review: Budget Pick*. All3DP.

<https://all3dp.com/1/elegoo-mars-2-review-3d-printer-specs/>

Kohut, A. (2023, April 20). *This 3D printed device makes resin cleanup a snap*. All3DP.

<https://all3dp.com/4/this-3d-printed-device-makes-resin-cleanup-a-snap/>

Satterfield, C., PhD, & Satterfield, C., PhD. (2022, October 10). How to 3D Print with Resin: A Step by Step Guide. *3D Print Knowledge - Helping You Learn About 3D Printing*.

<https://3dprintknowledge.com/how-to-3d-print-with-resin-a-step-by-step-guide/>

