



# UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche

---

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Meccanica

## **Riprogettazione di prodotti attraverso tecniche di simulazione e di Design for Additive Manufacturing**

*Product redesign through simulation and Design for  
Additive Manufacturing techniques*

Relatore:

Prof. Michele Germani

Correlatore:

Prof. Marco Mandolini

Tesi di Laurea di:

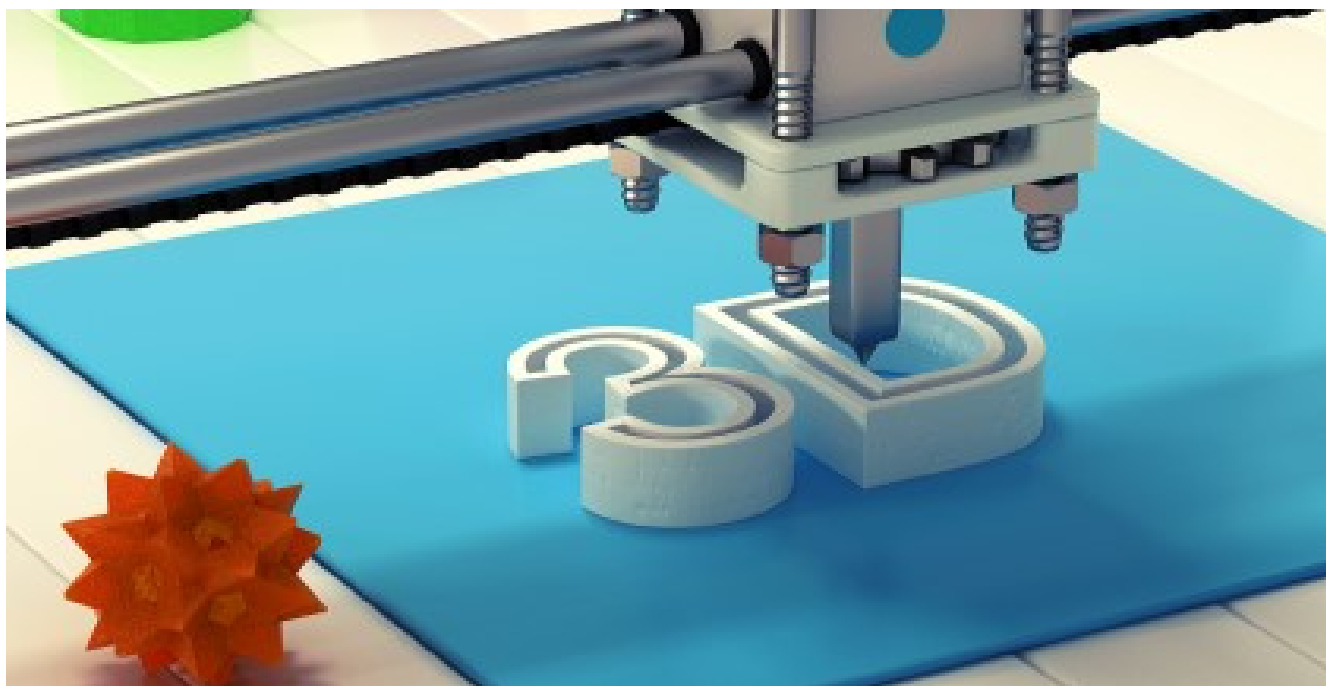
Monachesi Alessandro

Anno Accademico 2019/2020





UNIVERSITÀ  
POLITECNICA  
DELLE MARCHE



## **Riprogettazione di prodotti attraverso tecniche di simulazione e di Design for Additive Manufacturing**

*Product redesign through simulation and Design for Additive Manufacturing techniques*

Tesi di Laurea di: **MONACHESI ALESSANDRO**

**Supervisore e Relatore:** *Prof. Germani Michele*, Dipartimento di  
Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche (DIISM)  
UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

**Correlatore:** *Prof. Marco Mandolini*, Dipartimento di  
Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche (DIISM)  
UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

Cover: *Additive manufacturing molding technique for plastic component*, from Google photo

Ancona, Italy 2020

# Prefazione

---

Nella trattazione sviluppata in seguito sottoforma di tesi, si andrà a descrivere il processo necessario per la valutazione in ambito progettuale ed economico di utilizzare una tecnica di produzione di tipo additivo, più comunemente chiamata Additive Manufacturing, per ovviare alla classica tecnica di stampaggio ad iniezione per componenti plastici.

Il lavoro di valutazione è frutto dell'attività di tirocinio che il sottoscritto ha svolto tramite *il Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche (DIISM)* dell'Università Politecnica delle Marche con l'azienda *Nuova Simonelli* di Belforte del Chienti (MC), per un totale di circa 150 ore.

La seguente tesi ha lo scopo di andare a introdurre e descrivere le principali tecnologie dell'Additive Manufacturing, per migliorare la comprensione al lettore, verranno poi descritte le tecniche ed accorgimenti che sono stati utilizzati per la riprogettazione e del componente, per visualizzare al meglio tutto il lavoro eseguito verranno introdotte all'interno della tesi dei screenshot di schermate dei sistemi CAD e software utilizzati. Di tutte le diffusissime tecniche di stampa 3d, la seguente tesi, mira alla descrizione delle tecniche di stampaggio dei polimeri, per le altre categorie di materiali è possibile documentarsi tramite le tesi redatte dai miei colleghi. Per la parte di valutazione economica ci si rifarà solamente nelle conclusioni in quanto tutto il processo di calcolo dei costi è stato assegnato al mio collega Luca Mazzanti e sarà spiegato nella sua Tesi.

# Ringraziamenti

---

In primis, vorrei ringraziare il Prof. Michele Germani e il Prof. Marco Mandolini, per la disponibilità datami per svolgere il tirocinio col il loro dipartimento, l'aiuto che mi hanno fornito tramite le loro conoscenze per svolgere il tutto e per avermi fatto avvicinare al mondo dell'AM, da cui ho acquisito moltissime conoscenze che spero possano essermi utili in futuro.

Un ringraziamento anche al Ing. Parrini della Nuova Simonelli per la disponibilità e per avermi accolto in azienda e fornito tutti gli strumenti necessari per il tirocinio.

Per ultimi, ma non certamente per importanza, un ringraziamento speciale alla mia famiglia, i miei amici e colleghi che mi hanno sostenuto e purtroppo per loro supportato, in questo lungo periodo di studi sia nei momenti di difficoltà che in quelli più sereni.

Monachesi Alessandro

# Sommario

---

Capitolo 1: Introduzione all'Additive Manufacturing.....	10
1.1 Che cos'è l'Additive Manufacturing.....	10
1.2 vantaggi e svantaggi .....	12
1.3 Materiali.....	18
1.3.1 Materiali polimeri.....	20
1.3.2 I Materiali Metallici.....	23
1.4 Campi di Applicazione.....	25
Capitolo 2: Tecniche di Stampaggio.....	28
2.1 Introduzione.....	28
2.2 Fused Deposition Modelling (FDM).....	28
2.2.1 Descrizione.....	28
2.2.2 Processo di Stampa.....	28
2.2.3 Macchine e Materiali.....	29
2.2.4 Vantaggi e Svantaggi.....	30
2.3 Selective Laser Sintering(SLS).....	31
2.3.1 Descrizione.....	31
2.3.2 Processo di stampa.....	31
2.3.3 Macchine e Materiali.....	33
2.3.4 Vantaggi e Svantaggi.....	35
2.4 Stereolitografia (SLA).....	36
2.4.1 Descrizione.....	36
2.4.2 Processo di stampa.....	36
2.4.3 Macchine e Materiali.....	37
2.4.4 Vantaggi e Svantaggi.....	38
2.5 Material Jetting (MJ).....	39
2.5.1 Descrizione.....	39
2.5.2 Macchine e Materiali.....	40
2.5.4 Vantaggi e Svantaggi.....	40
2.6 Grafici Sviluppo stampa 3D.....	41

2.7 Work-Flow dell'AM.....	42
2.8 Modellazione 3D e creazione file .Stl (Solid To Layer).....	43
2.9 Fase dello Slicing.....	44
2.10 Scrittura del Gcode.....	45
2.11 Stampaggio del componente.....	45
2.12 Post-Processing.....	46
2.13 LeanCost.....	47
2.13.1 Solid edge.....	48
2.13.2 Ultimaker Cura.....	49
Capitolo 3: Caso di Studio.....	50
3.1 Introduzione.....	50
3.2 Collettore di Scarico Inferiore/Superiore.....	51
3.3 Calcolo costi Stampaggio ad Iniezione.....	53
3.4 Risultati dell'Analisi.....	58
Capitolo 4: Riprogettazione del componente in ottica Additive Manufacturing.....	60
4.1 Introduzione.....	60
4.2 Regole Modellazione per la Stampa 3D.....	60
4.2.1 Orientamento di Stampa.....	61
4.2.2 Stress Termici.....	63
4.2.3 File ad Alta risoluzione e Bad Edge.....	64
4.2.4 Alcune regole generale per la progettazione in 3d.....	65
4.3 Riprogettazione Collettore Superiore.....	67
4.3.1 Fasi della Riprogettazione.....	68
4.4 Riprogettazione Collettore di Scarico inferiore.....	73
4.4.1 Fasi della Riprogettazione.....	74
4.5 Risultato Finale.....	79
Capitolo 5: Simulazioni di Stampa & Calcolo dei Costi.....	80
5.1 Simulazione del Processo di Stampa.....	80
5.2 Preventivazione dei costi tramite siti in AM.....	82
5.3 Stampa dei Componenti.....	84
5.4 Confronto Costi Finali dei Componenti.....	91
Capitolo 6: Conclusioni.....	89
Bibliografia.....	91





# Capitolo 1: Introduzione all'Additive Manufacturing

## 1.1 Che cos'è l'Additive Manufacturing?

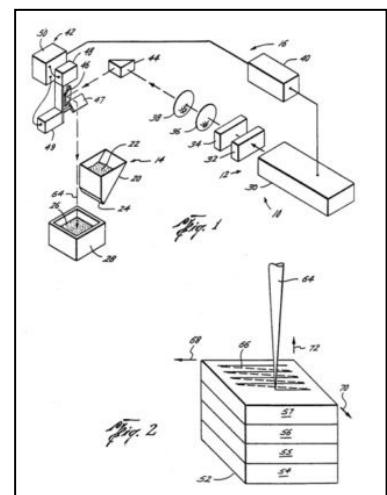
Con il termine *Additive Manufacturing* si identificano tutte quell'insieme di tecnologie utilizzate per la produzione di elementi fisici, ottenuti mediante la sovrapposizione di strati di materiali di vario genere l'uno sull'altro, partendo da modelli digitali tridimensionali ottenuti dalla progettazione assistita da calcolatore (*Computer-aided design o CAD*).



*Figura 1.1: esempio tecnologia additiva*

*Figura 1.2: brevetto tecnologia Sls*

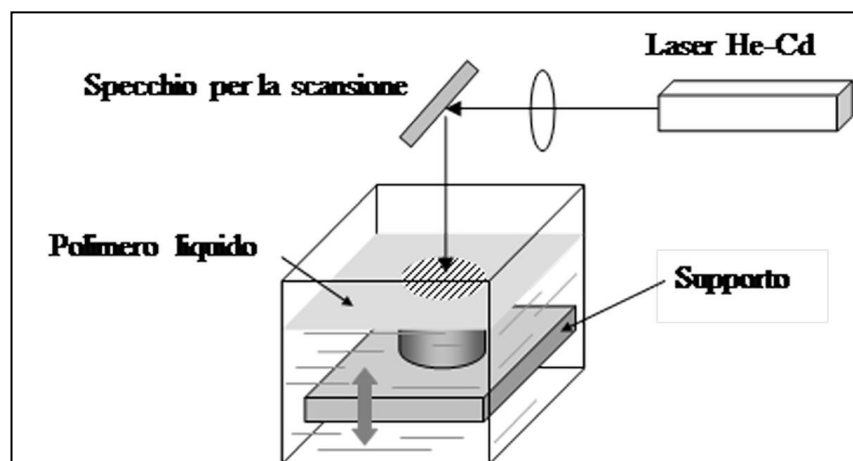
Nonostante l'uso di questa tecnologia è stato ampliato solo nell'ultimo decennio coll'avvento dell'industria 4.0, la tecnologia additiva ha una storia molto più antecedente, infatti, i primi tentativi di realizzazione di oggetti solidi tramite l'impiego dei fotopolimeri risalgono alla fine degli anni '60, e furono condotti presso il *Battelle Memorial Institute, a Columbus, Ohio*. Tale attività di ricerca iniziale portò ad un setup sperimentale in cui due fasci laser, di lunghezza d'onda diversa, si incrociavano in un punto all'interno di un recipiente, riempito da resine fotopolimeriche inventate dalla DuPont, con lo scopo di solidificare una certa quantità di volume (*figura 1.2*).





**Figura 1.3** : apparecchiature utilizzate dall'Ing C.Hull, 1982, Università del Colorado

La nascita ufficiale della stampa 3D avviene con ufficializzazione diversi decenni dopo quando nel 1982, l'Ingegnere Chuck Hull depositò il brevetto per una nuova tecnologia detta stereolitografia e con la successiva fondazione dell'azienda *3D Systems*, leader tutt'oggi indiscussa nel settore della prototipazione rapida. Nel brevetto di Hull, una luce concentrata ultravioletta viene focalizzata su una superficie di una vasca piena di polimero liquido fotopolimero. La luce, mossa da un computer, disegna ogni strato dell'oggetto sulla superficie liquida, che si indurisce e si polimerizza. Un sistema CAD/CAM/CAE manovra la luce modellando la forma dell'oggetto in un numero elevato di strati. Partendo dal più basso fino in cima.



**Figura 1.4**: schema del brevetto di C.Hull

## 1.2 Vantaggi e Svantaggi

L'additive manufacturing è un processo tecnologico che fin da subito è stato sviluppato per ovviare alle classiche forme di produzione mediante l'uso di stampo o per asportazione di materiale. Con esso possiamo invece di partire da un pieno da svuotare (tipico approccio frutto dell'utilizzo di tecnologie CNC a controllo numerico), possiamo costruire strato su strato rispettando i pieni ed i vuoti delle geometrie.

I diversi metodi di Fabbricazione Additiva presentano vantaggi e svantaggi, ognuno rispetto agli altri, riconducibili alle loro specifiche caratteristiche del processo produttivo; tuttavia, mettendoli in contrapposizione con le tecniche tradizionali, è possibile identificare una serie di benefici e limiti riconducibili all'intera categoria.

Tra i vantaggi legati al processo di produzione:

- Possibilità di creare oggetti con forme totalmente differenti tra loro avendo a disposizione una sola macchina.  
Ciò permette di non avere più il disagio di creare uno specifico stampo per un singolo pezzo, andato ad eliminare moltissime lavorazioni meccaniche per la sua creazione.
- Permette di semplificare il processo produttivo in un unico step.  
Non è necessario lo spostamento del pezzo da lavorare da una macchina all'altra, con l'eliminazione dei tempi di setup per il cambio di: pezzi, utensili, macchina.
- Nella fabbricazione in additive i tempi e i costi di realizzazione dipendono solo dalle dimensioni del pezzo e non dalla sua complessità geometrica, questo è forse l'aspetto più rilevante della Fabbricazione Additiva.

Mentre nelle tecniche tradizionali il costo per ciascuna unità aumenta in maniera esponenziale al crescere della sua

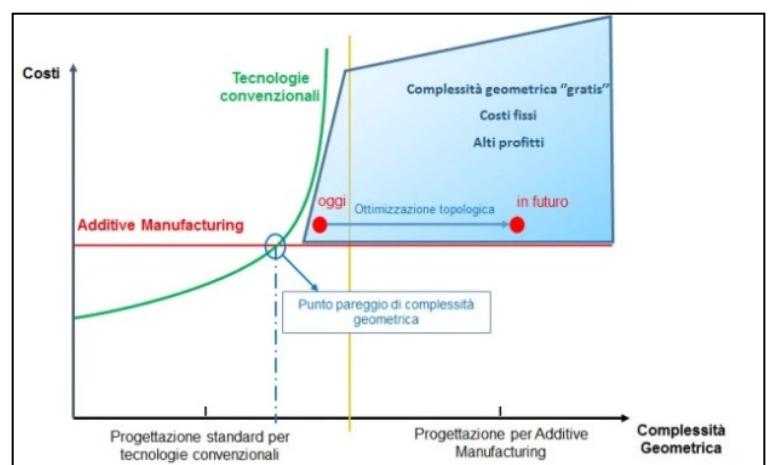


Figura 1.5: grafico andamento costi-complessità geometrica

complessità geometrica, nelle tecniche additive tale costo in funzione della complessità risulta quasi costante

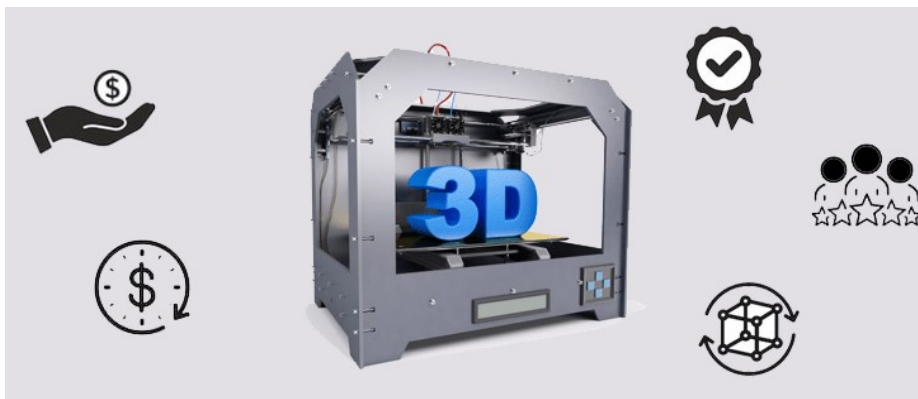
- L'assenza di attrezzature o sistemi di bloccaggio, necessari nelle tradizionali tecniche di lavorazione
- L'intervento da parte dell'operatore è minimo e riguarda le fasi precedenti e successive alla lavorazione, questo significa che durante la lavorazione può essere impegnato in altre mansioni.
- Additive manufacturing è inoltre sinonimo di scarto di lavorazione molto ridotto o addirittura nullo. Ciò si traduce in riduzione di costi per l'acquisto di materie prime ma anche in costi minori per lo smaltimento o la trasformazione degli scarti di processo.
- Brevi tempi di "Time to Marketing", ovvero periodo di tempo che intercorre tra la fase di ideazione e progetto, e quella di commercializzazione. Da questo punto di vista, l'additive manufacturing ha nettamente ridotto i tempi. Basti pensare che i nuovi software ed i nuovi sistemi di stampa 3d consentono di progettare e realizzare modelli fisici nel giro di poche ore, all'interno della stessa giornata lavorativa.



**Figura 1.6:** processo "Time to Marketing"

Invece per quanto riguarda i vantaggi legati al prodotto si hanno:

- Gli oggetti realizzati hanno mediamente un peso minore rispetto a quelli ottenuti con le tecniche tradizionali, questo perché con le tecniche additive si aggiunge materiale solo là dove necessario, riducendo al minimo lo scarto di materiale tipico nelle lavorazioni ad asportazione di materiale
- Un'altra caratteristica rilevante riguarda la possibilità di costruire parti integrate, mentre nelle tecniche tradizionali era necessario produrre indipendentemente ogni singolo componente per poi assemblarlo, con la fabbricazione Additiva è possibile realizzare parti integrate eliminando uno step produttivo.
- Elevata personalizzazione del prodotto: questo è un elemento sempre più richiesto nel mercato del largo consumo ed è possibile in quanto per produrre elementi differenti è sufficiente disporre del modello CAD 3D, senza la necessità di cambiare macchina o attrezzatura di lavorazione.
- *buy-to-fly ratio*: (abbr. BTF) è il rapporto tra il peso del materiale grezzo acquistato e quello del pezzo finito, quindi maggiore sarà questo indicatore e maggiore sarà la quantità di scarti nella produzione. Questo rapporto presenta valori elevati nel caso della produzione dei componenti attraverso i tradizionali metodi di manifattura sottrattiva, rapporto che viene drasticamente ridotto grazie alla tecnologia AM
- Poiché la creazione di prototipi è più semplice, più rapida e meno costosa, è dunque logico che sia più facile per i team di ricerca e sviluppo, realizzare prototipi e sviluppare i prodotti più rapidamente in base alle esigenze della domanda. Per restare competitivi, gli imprenditori industriali hanno bisogno di essere reattivi e di attenersi il più possibile alle richieste dei clienti.



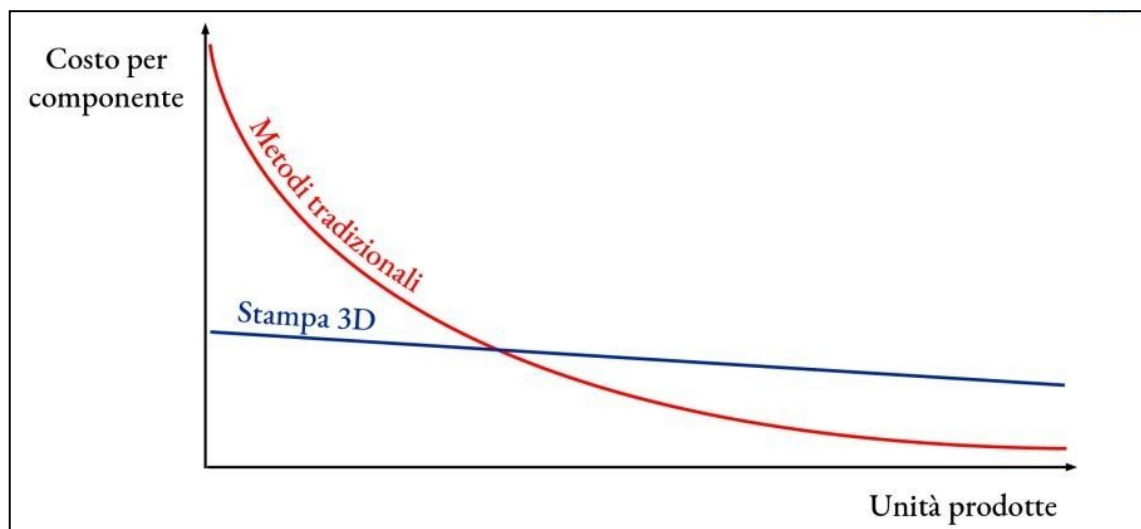
**Figura 1.7:** schema vantaggi della stampa 3D

Nonostante gli innumerevoli sviluppi e miglioramenti di questa tecnologia negli ultimi anni ancora presenta alcune lagune che non le permettono di essere utilizzata come unico sistema di produzione e sostituire completamente i classici sistemi di lavorazione. Andremo ora elencare come nel caso precedente sia gli svantaggi legati a processo che quelli legati al prodotto.

Tra i particolari svantaggi legati al processo troviamo:

- Le dimensioni dei pezzi sono vincolate dalla grandezza della macchina e i volumi di lavoro, a causa delle modalità di lavorazione, non possono essere sfruttati al massimo (fa eccezione la tecnica *Selective Laser Sintering (SLS)* che è in grado di sfruttare l'intero volume di lavoro).
- Velocità di lavorazione inferiore rispetto alle tradizionali tecniche produttive, non paragonabili ad esempio allo stampaggio, di conseguenza il principale utilizzo è volto a prodotti ad elevata personalizzazione, non adatta per la produzione in serie e per volumi grandi di lotti.

**Figura1.8:** confronto dei costi della stampa 3d con metodi tradizionali in relazione alla quantità prodotte



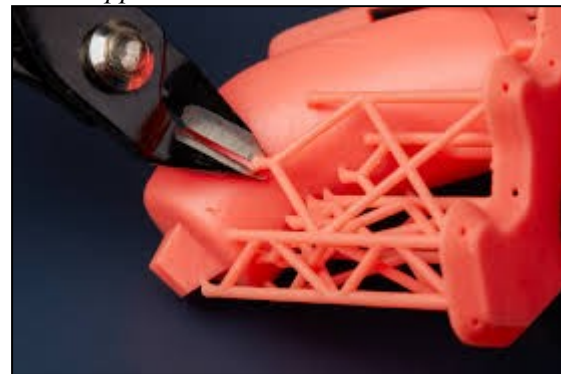
- Ogni macchina è in grado di utilizzare una ristretta gamma di materiali, limitandone così la flessibilità di produzione. Un ulteriore problema è derivante dal cambio di materiale da impiegare per la produzione. Lavorando con polveri il problema della cross-contamination è elevato, difatti, polveri particolarmente reattive tra loro potrebbero causare incendi o esplosioni o rovinare i componenti interni della macchina. Per evitare tale problematica è necessario effettuare una pulizia accurata della macchina, ciò causa tempi di fermo macchina talvolta eccessivamente lunghi, così rallentando notevolmente la produzione.



*Figura 1.9: esempio componente stampato con diversi materiali*

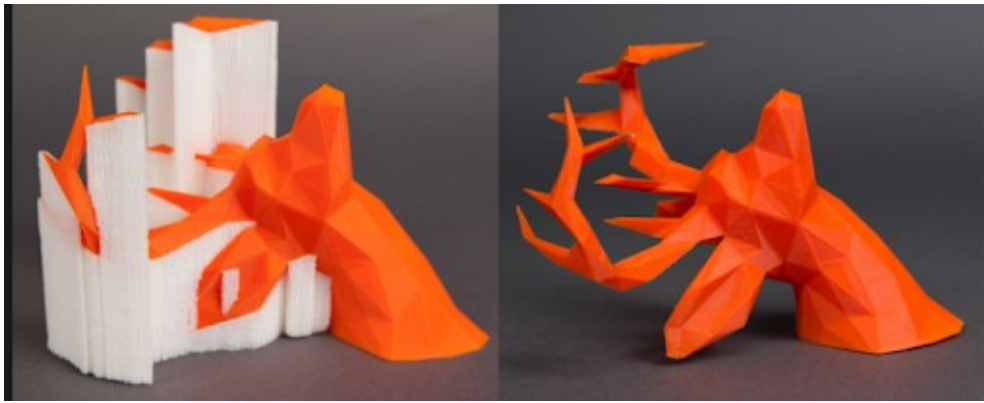
I limiti relativi al prodotto sono:

- L'esigenza di inserire strutture di supporto, che non sono altro che strutture non presenti originariamente nel nostro disegno e che vengono aggiunte dalla macchina quando vengono rilevate parti sospese. Praticamente il software si accorge della mancanza di un layer di sostegno e quasi in autonomia lo crea. Ciò va a creare due svantaggi, il primo dovuto ad un utilizzo del materiale maggiore rispetto a quello necessario per la produzione del pezzo senza supporti e un secondo svantaggio legato all'attività di post-processing che deve essere eseguita per andare ad eliminare i supporti.



*Figura 1.10: tecnica di eliminazione dei supporti*





*Figura 1.11: esempio utilizzo dei supporti*

- La finitura superficiale varia al variare delle diverse tecniche e anche delle macchine adottate, ma è comunque inferiore rispetto a quella ottenibile con le lavorazioni “sottrattive”, se la finitura richiesta è particolarmente alta è necessaria quindi una successiva lavorazione oppure l’utilizzo di particolari resine o solventi.



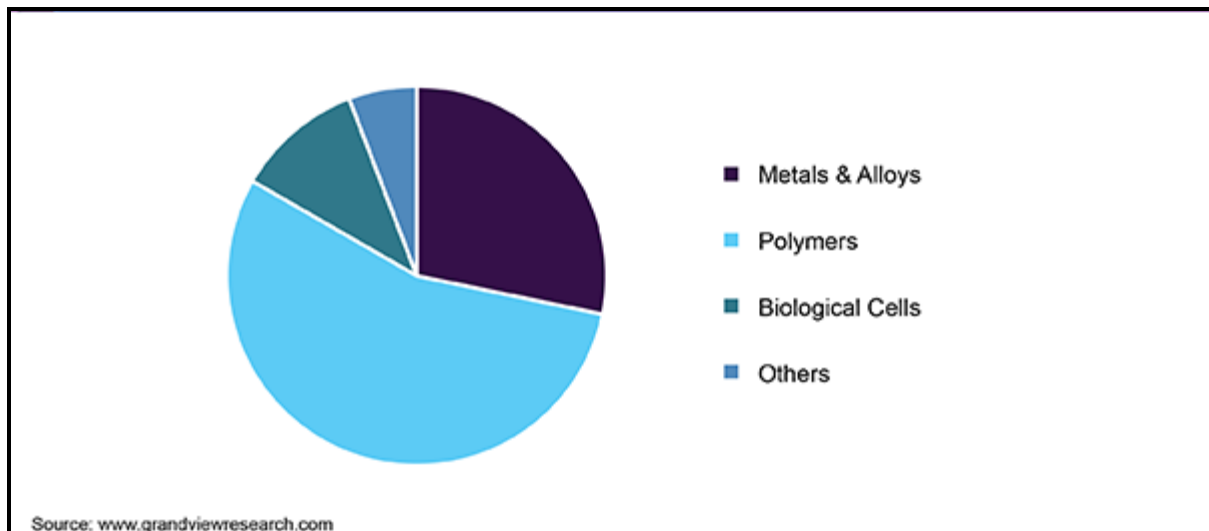
*Figura 1.2: esempio di componente trattato (sx) e componente appena stampato (dx)*

- La gamma di materiali commerciali è ancora ridotta e soltanto alcuni di questi permette la realizzazione di parti definitive. Inoltre, il costo di questi è elevato in quanto sono venduti dalle rispettive aziende produttrici delle macchine.

## 1.3 Materiali

Lo sviluppo dei materiali da utilizzare nella tecnologia additiva negli ultimi anni è andato di pari passo con lo sviluppo del processo stesso, basti pensare agli inizi di questa tecnologia che permetteva l'uso di una gamma ristrettissima di materiali con pochi tipi di tecniche additive. Oggi essendo largamente ampliato l'uso di questa tecnologia nel mercato odierno si sono sviluppate nuove tecniche appositamente per la stampa di determinati materiali.

I materiali principalmente utilizzati oggi spaziano dai più classici come i materiali plastici, fino agli ultimi sviluppati come i materiali metallici. Per il futuro una grande quantità di ricerche condotte sul potenziale dei bio-materiali di stampa 3D per una serie di applicazioni mediche. Il tessuto vivente è stato indagato al fine di sviluppare applicazioni che includono la stampa di organi umani per il trapianto, così come i tessuti esterni per la sostituzione di parti del corpo.



*Figura 1.1.3: materiali utilizzati nella stampa 3d*

Nella tabella seguente vengono illustrati i principali materiali attualmente utilizzati per la realizzazione di componenti dalle principali tecnologie di Additive Manufacturing; principalmente vengono utilizzati materiali polimerici, metallici, compositi e ceramici. (figura 1.14)

Materiali	Tecnologie
Fotopolimero (Resina termoindurenti)	Stereolitografia, Polyjet, Project, Direct Light Projection
Termoplastico a basso punto di fusione	Drop on Demand
Termoplastico definitivo	Fused Deposition Modelling, Selective Laser Sintering
Ceramici	Three Dimensional Printing, Selective Laser Sintering
Metalli	Three Dimensional Printing, Selective Laser Melting, Electron Beam Melting, Laser Deposition
Compositi	Ultrasonic Additive Manufacturing

	Material extrusion	Material jetting	Binder jetting	Vat photopolymerization	Sheet lamination	Powder bed fusion	Directed energy deposition
Polymers, polymer blends	x	x	x	x	x	x	
Composites	x	x	x	x	x	x	
Metals	x	x	x		x	x	x
Graded/hybrid metals					x		x
Ceramics	x	x	x	x		x	
Investment-casting patterns		x	x	x		x	
Sand molds and cores	x		x			x	
Paper/wood	x				x		

### 1.3.1 Materiali Polimerici

I materiali polimerici sono la famiglia di materiali che conta la più ampia varietà di scelta quando si tratta di Additive Manufacturing. Le diverse tipologie sono caratterizzate da diverse proprietà tra cui scegliere: trasparenza, colore, resistenza alla trazione, rigidità ed elasticità, lavorabilità e altre. Queste caratteristiche vengono determinate dal tipo di polimeri che si vuole utilizzare in relazione alla proprietà che vogliamo conferire al componente finale.

Per classificare questa macro-famiglia di componenti plastici ci si riferisce al loro comportamento ad alte temperature, infatti avremo:

- **Materiali termoplastici:** reagiscono al calore rammollendo ed acquisendo quindi una malleabilità che ne permette la modellazione per formare prodotti finiti e successivamente, tornano ad acquisire rigidità. Essi sono i più utilizzati nelle applicazioni tecnologiche in quanto presentano ottime caratteristiche meccaniche, alta resistenza all'impatto, all'abrasione e ai prodotti chimici. Possono anche essere riempiti con carbonio, vetro o altri additivi per migliorarne le proprietà fisiche.

*Es: ABS, PLA, PS, PETG, Nylon, PC, ecc...*

- **Materiali termoindurenti:** una volta raggiunto lo stato solido non è possibile fonderli nuovamente, se sottoposti ad alta temperatura vengono danneggiati. Più adatti per le applicazioni in cui l'estetica è importante, in quanto possono produrre parti con superfici più lisce e dettagli fini simili allo stampaggio a iniezione. Generalmente hanno elevata rigidità ma sono più fragili dei materiali termoplastici, quindi non sono adatti per applicazioni funzionali.

*Es: Poliuretano (PUR), Resine epossidiche (EP), ecc...*

Per essere utilizzati nella stampa 3D questi materiali, specialmente i materiali termoplastici, si presentano sottoforma di filamenti di spessore in genere di 1,75mm, avvolti attorno delle bobine. Di seguito andremo ad elencare e spiegare i principali filamenti utilizzati in questo processo:



-ABS (acrilonitrile butadiene stirene):  
Questo materiale presenta delle buone

caratteristiche meccaniche, infatti l'ABS stampato presenta una resistenza fino all'80% rispetto all'ABS stampato a iniezione, caratteristica che lo rende idoneo per le applicazioni funzionali. Questo materiale è opaco e disponibile in diverse varianti di colore. Necessito durante lo stampaggio di un ambiente arieggiato in quanto durante l'estrusione produce fumi tossici che possono essere nocivi per la salute. Per la stampa ottimale dell'ABS bisogna settare determinati parametri:

Temperatura estrusore: dai 220 ai 240 gradi

Temperatura del piatto di stampa: dagli 80 ai 100 gradi

*-PLA (acido polilattico):* Il materiale più utilizzato per la stampa 3D sia per la sua semplicità di utilizzo e sia per il prezzo economico, facile da stampare e può essere stampato a bassa temperatura e non richiede un letto riscaldato. il PLA è un materiale



biodegradabile organico di origine vegetale, creato dalla lavorazione di vari prodotti vegetali, tra cui mais, patate o barbabietole da zucchero, per questo è considerata una plastica 'ecologica' ed è utilizzato principalmente in imballaggi per alimenti e contenitori. Durante il processo di raffreddamento, l'oggetto può essere soggetto ad elevate riduzioni di geometria fino al 3%. I PLA più economici causano rotture improvvise del filamento durante la stampa, presentano una sezione discontinua e causano un effetto ragnatela. Lo stampaggio corretto del PLA avviene tramite a una temperatura dell'estrusore compresa tra i 190÷210 gradi



*-PETG (Polietilene Tereftalato Glicole):* è una versione modificata del PET, dove la lettera "G" sta per "glicole modificato", che viene aggiunto alla composizione del materiale durante la polimerizzazione.

Il risultato è un filamento più chiaro, meno fragile e più facile da usare rispetto alla sua forma base di PET, e soprattutto molto facile da estrudere e da riciclare. Questo materiale gode di: alta resistenza meccanica e flessibilità, resistenza agli urti, resistente agli attacchi chimici e inodore. Rispetto al PLA presenta una maggiore resistenza meccanica e non soffre del fattore di riduzione del 3% e rispetto all'ABS non produce fumi tossici durante la stampa. Per la stampa ottimale del PETG bisogna settare determinati parametri:

Temperatura estrusore: dai 220 ai 240 gradi

Temperatura del piatto di stampa: 70 gradi

-*Nylon*: è una plastica sintetica, poliammidica, dotata di notevoli proprietà meccaniche. Ricordiamo alcune caratteristiche fondamentali come: elevata durezza, alto rapporto resistenza/peso, flessibilità, basso attrito, resistenza alla corrosione e infine, la capacità di resistere a stress



meccanici significativi. Rispetto alla tradizionale ABS e PLA, il Nylon, nello stampaggio non crea dei fumi tossici e non ha elevati valori di restrizione come nel caso del PLA. Il suo più grande difetto, che fa preferire l'utilizzo di altri filamenti, è la sua grande difficoltà ad essere stampato, infatti se il filamento non viene asciugato prima dell'utilizzo dall'acqua, può esserci la rottura del filamento stesso. Questo problema viene ancora di più accentuato dal fatto che essendo, il nylon un materiale igroscopico, ha una elevata tendenza ad assorbire l'acqua. Per la stampa ottimale del Nylon bisogna settare determinati parametri:

Temperatura estrusore: dai 220 ai 250 gradi

Temperatura del piatto di stampa: dai 60 agli 80 gradi

-*Polycarbonato (PC)*: Il PC è un polimero termoplastico ottenuto dall'acido carbonico. A differenza di molti polimeri termoplastici può sopportare grandi deformazioni plastiche senza rompersi, ha buona resistenza all'impatto e al



calore. Viene utilizzato principalmente per la stampa di parti complesse, in quanto non lascia sbavature sulle superfici ed è possibile ottenere buone finiture. per essere estruso e richiede temperature maggiori di 260°C. Ha problemi di adesione, quindi necessita di un piano riscaldato a circa 100°C.

Dopo aver descritto i principali filamenti termoplastici, ci occuperemo ora dell'altra categoria di polimeri, ovvero i materiali termoindurenti:

- *Resine epossidiche (EP)*: Sono caratterizzate da ottima resistenza meccanica e termica, ritiro quasi nullo o trascurabile, facilità di lavorazione ed eccellente finitura superficiale, possono resistere ad elevate temperature e a sforzi meccanici e all'usura.

### 1.3.1 I Materiali Metallici

Sebbene la varietà dei metalli utilizzata nel settore della fabbricazione additiva, sia di gran lunga inferiore rispetto alla famiglia dei polimeri, è comunque doveroso descriverne brevemente le principali caratteristiche. Su questi tipi di



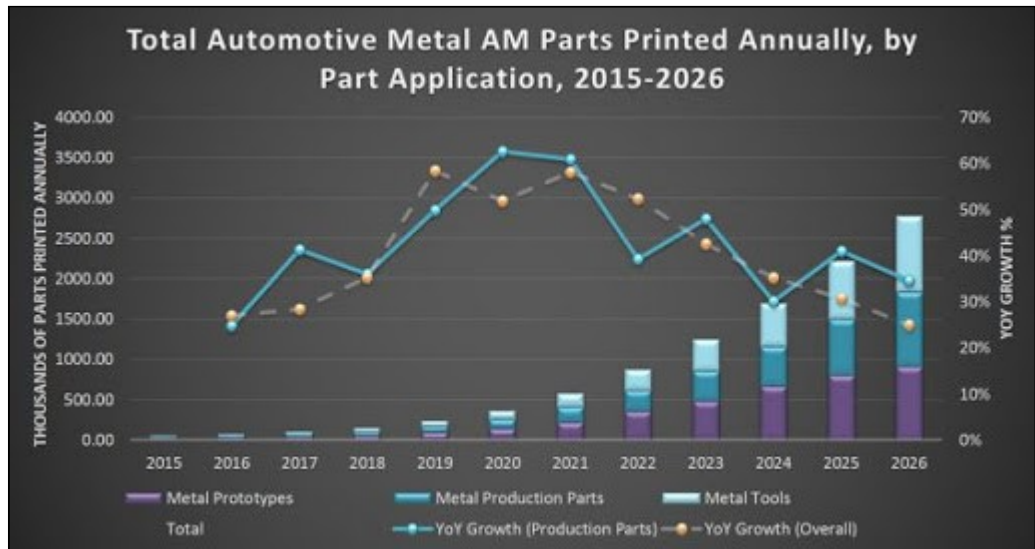
*Figura 1.15: esempio di stampaggio Selective laser melting (slm)*

materiale si sta concentrando principalmente lo studio da parte dei ricercatori, infatti anno dopo anno la lista dei metalli che possono essere utilizzati nel settore dell'AM è in forte aumento, utilizzati non solo per la prototipazione ma anche per pezzi da uso finale.

Oggi possiamo avere a disposizione infatti: Acciaio per utensili, Acciaio inossidabile, Leghe di Alluminio, Leghe di Titanio, Leghe a base di Nickel, Leghe di Cobalto-Cromo, Oro, Argento, Rame ed altre ancora. Le tecnologie Additive oggi sono in grado di creare dei pezzi stampati aventi densità prossime al 100%, senza microcavità o difetti, garantendo proprietà prossime o talvolta superiori ai componenti ottenuti per fonderia, con costi e tempi sensibilmente più sostenuti. Inoltre il processo di realizzazione di componenti metallici con tecniche di AM prevede una solidificazione in tempi ridotti rispetto alle tecniche tradizionali, questo comporta la generazione di grani di dimensione minore aventi una distribuzione più uniforme, e di conseguenza si ottengono componenti con proprietà meccaniche migliori.

Proprio per questo le aziende si stanno orientando in questo settore, infatti nel 2016 erano stati venduti circa 983 sistemi di produzione additiva con metallo. Nel 2017, questo numero è salito dell'80% a 1.768 (fonte: Quartz) e di pensa che questo trend andrà ad aumentare anche nei prossimi anni.

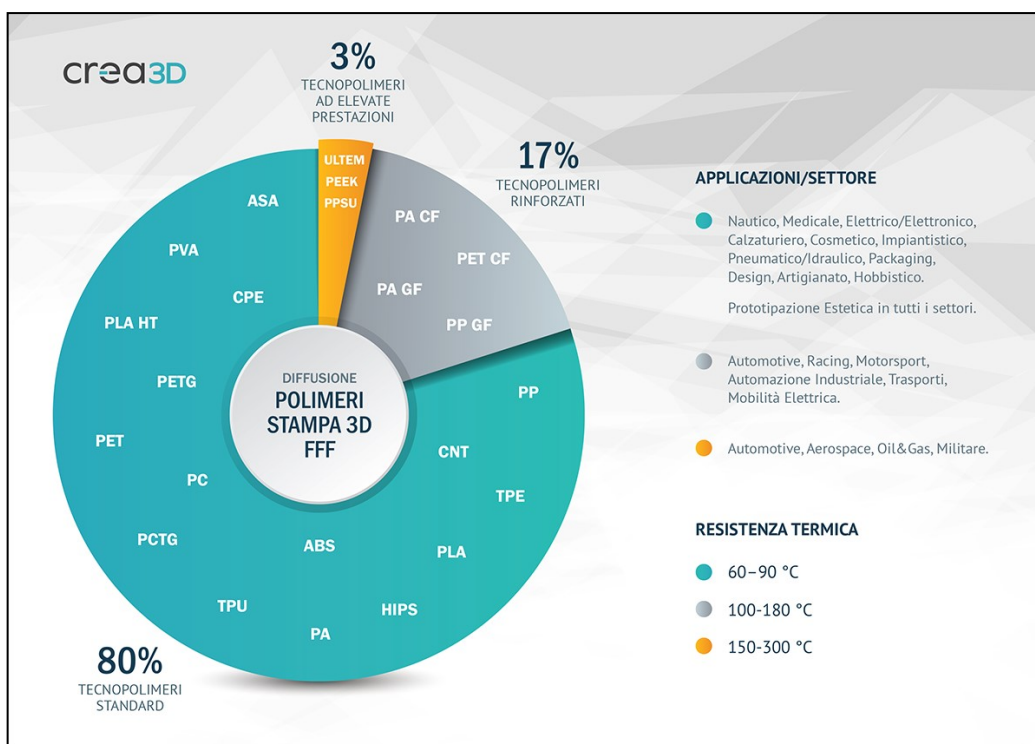
**Figura 1.16:**  
previsioni dei  
componenti  
stampati in  
metallo nei  
prossimi anni





## 1.4 Campi Di Applicazione

Nei suoi primi utilizzi la tecnologia Additive Manufacturing veniva utilizzata principalmente per la creazione di manufatti di piccole dimensioni, per lo più in polimeri, utilizzati come prototipi. Questi sistemi di stampa 3D, con il continuo sviluppo di questo settore, stanno guadagnando ovunque terreno e vedono ampliarsi di continuo il ventaglio dei loro possibili settori di applicazione e destinazione, rendendolo un processo applicabile a ogni sfida industriale e non solo più nella prototipazione ma anche nella creazione di parti funzionali.



*Figura 1.17: campi applicazione della stampa 3d nei vari settori*

Tra i notevoli campi di applicazione, descriveremo solamente quelli in cui negli ultimi anni questo processo ha prevalso e ha portato significativi cambiamenti, come:

- **AUTOMOTIVE / MOTORSPORT:** Alcune delle principali case automobilistiche, infatti per la produzione di veicoli utilizzano la tecnologia di stampa 3D per la produzione di componenti automobilistici complessi, in



*Figura 1.18: modello Jaguar XKSS restaurato tramite l'uso di pezzi riprogettati e ristampati in AM e presentata al Los Angeles nel 2017*

modo da ridurre i tempi di consegna per sviluppare nuovi modelli di veicoli e per ridurre i costi associati alle fasi di sviluppo del prodotto.

Con l'ausilio della prototipazione rapida è possibile creare strutture più leggere e ridurre il numero di componenti dell'auto, alleggerendo il peso complessivo dell'automobile. Un'auto più leggera consuma meno carburante

ed è quindi maggiormente rispettosa dell'ambiente. Alcuni esempi di applicazione sono: parti strutturali, parti di turbocompressori, alloggiamenti, valvole e molti altri.



**Figura 1.19:** maschera di protezione della ruota in stampa 3d. In precedenza, sarebbe costata 800€, ora costa 21€ e con tempi di sviluppo che passano da 56 a soli 10 giorni

➤ MEDICO: La stampa 3D nel settore sanitario consente a medici, ricercatori e



**Figura 1.20:** protesi dentale ricavata della stampa in 3d

produttori di apparecchiature medicali di lavorare rapidamente, di effettuare test approfonditi e di personalizzare i dispositivi per la terapia dei pazienti. La produzione rapida di protesi, guide chirurgiche e modelli di organi da immagini

diagnostiche è possibile grazie ad una stampante 3D. L'esperienza pratica, il "toccare con mano" è

fondamentale per medici e chirurghi, ma i modelli anatomici tradizionali sono spesso molto costosi. È possibile grazie a questa tecnologia di andare ad ottenere parti di ossa da sostituire, basandosi su disegni ricavati da tac e risonanze magnetiche. In futuro si pensa perfino di andare a stampare

biomateriali, ovvero gli strati di materiale del paziente per la ricostruzione di tessuti danneggiati ad esempio.



*Figura 1.21: protesi della gamba in titanio*

- **AEROSPAZIALE:** utilizzano tecnologia AM per la creazione di componenti per propulsori e per strutture interne.
- **ARCHITETTURALE/ARTISTICO:** la stampa 3D aiuta gli artisti a trasformare le idee in opere d'arte. Sempre più spesso, artisti da tutto il mondo utilizzano la tecnologia 3D per creare modelli con estremi livelli di complessità e dalle caratteristiche uniche e irripetibili. Questa tecnologia è utilizzata anche dai più grandi architetti per la realizzazione di plastici di edifici.



*Figura 1.22: coprivasi stampati del designer Libero Rutilo (sx) e plastico di un edificio (dx)*

# Capitolo 2: Tecniche Di Stampaggio

---

## 2.1 Introduzione

In seguito, andremo ad elencare e descrivere le principale tecniche di stampaggio in additive manufacturing, di tutte le innumerevoli macchine, ci soffermeremo solamente su quelle utilizzate per lo stampaggio di componenti plastici o resine in quanto sono state trattate per l'attività di tirocinio svolta, per le macchine che stampano componenti in metallo ci si può rifare ad altre tesi svolte da altri colleghi.

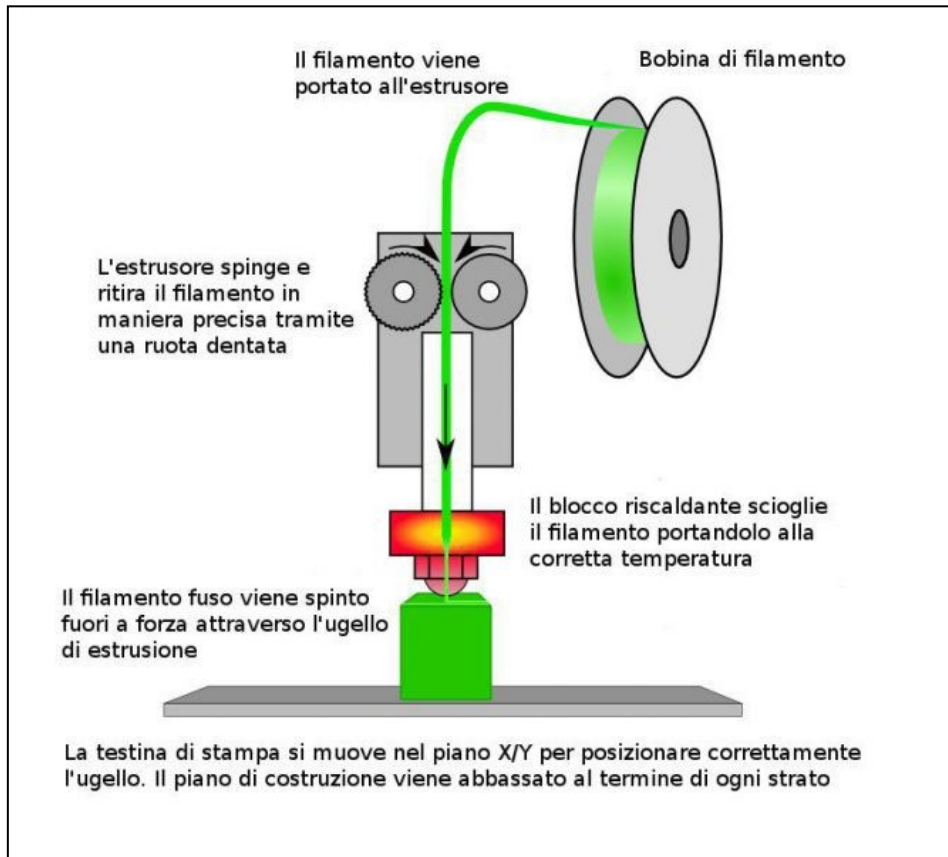
## 2.2 Fused Deposition Modelling (FDM)

### 2.2.1 Descrizione

La Fused Deposition Modelling (FDM) è una delle tecniche di Stampa 3D più conosciute in assoluto, la sua fama deriva dall'essere stata la prima tecnologia in grado di realizzare un componente utilizzando un materiale termoplastico definitivo. Un'altra caratteristica peculiare è la possibilità di realizzare i supporti di un materiale differente scioglibile in una soluzione formata da acqua e soda caustica, rendendo più agevole la rimozione a lavorazione ultimata.

### 2.2.2 Processo di stampa

Lo stampaggio avviene attraverso l'estrusione di due filamenti di materiale differente su una piattaforma di lavoro: le due testine, che attingono materiale da due bobine intelligenti, muovendosi sul piano XY, depositano il materiale in maniera da comporre il primo strato; successivamente la piattaforma di lavoro scende lungo l'asse Z permettendo alla testina di comporre lo strato successivo. Lo strato successivo che viene estruso si fonde con lo strato sottostante, costruendo l'oggetto dal livello più basso strato per strato, stampando in genere prima i bordi esterni poi i bordi interni e infine l'interno.



**Figura 2.1:** descrizione processo FDM

La logica alla base del processo è semplice, tuttavia è necessario un adeguato controllo sulle sue caratteristiche, in particolare la temperatura di estrusione deve essere adeguata: un suo valore eccessivo provocherebbe un processo di colata che comprometterebbe la precisione della lavorazione, una temperatura troppo bassa impedirebbe l'adesione del filamento con lo strato già depositato. Una volta terminata la lavorazione si procede con la rimozione dei supporti.

### 2.2.3 Macchine e Materiali

Le macchine che utilizzano questa tecnologia possono essere divise in due categorie: Design Series e Production Series. Le prime vengono utilizzate per creare i primi prototipi a valle della fase di progettazione, i valori specifici delle loro caratteristiche variano da macchina a macchina, ma possono essere generalizzati come di seguito:

- Volume massimo di lavoro: 254x254x304mm
- Spessore dello strato: 0.178mm, 0,254 mm, 0.33 mm;

Le Production Series sono macchinari di dimensioni maggiori e che permettono di realizzare i componenti definitivi. A causa del volume di lavoro maggiore, per non rendere eccessivamente lenta la lavorazione, lo spessore di strato utilizzato è



maggiore. Le sue caratteristiche sono:

- Volume massimo di lavoro: 910x610x914 mm;
- Spessore dello strato: .178mm, 0,254 mm, 0.33 mm, 0.58 mm;



I materiali attualmente disponibili sul mercato, forniti direttamente all'interno delle bobine intelligenti sono: ABSi, PC-ISO, ABS-M30, PC, ABS-M30i, FDM Nylon 12, ABS-ESD7, ULTEM9085 resin, PC-ABS, PPSF, ULTEM 1010 resin, ASA

*Figura 2.2: elemento stampato in ABSi con stampate Stratasys*

#### **2.2.4 Vantaggi e Svantaggi**

Tra i principali punti di forza di questa tecnica, oltre alla già citata possibilità di realizzare componenti definitivi e alla facilitata rimozione dei supporti, vi è l'assenza di lavorazioni di post trattamento e l'assenza di problemi di sicurezza legati alla macchina, la lavorazione infatti avviene all'interno della macchina e non c'è alcun contatto con l'operatore. Inoltre, è una tecnologia che permette di ottenere un componente con tolleranze dimensionali e rugosità superficiali soddisfacenti. Tra le principali tecniche di stampa è sicuramente la più economica sia perché utilizza materiali facilmente reperibili e di basso costo ma anche perché le macchine sono facilmente accessibili e per la loro economicità e semplicità.

I due principali limiti si possono invece ritrovare nell'impossibilità di sfruttare l'intero volume di lavoro: non è possibile realizzare un pezzo sopra l'altro a causa dell'eccessiva difficoltà nella rimozione del supporto, e nella limitata velocità della macchina, dovuta all'utilizzo di sole due testine che estrudono materiale.

La tecnologia FDM è un'ottima scelta perché consente di utilizzare materiali durevoli, che vantano ottime proprietà meccaniche e per il fatto che le parti prodotte sono di ottima qualità.

I materiali termoplastici utilizzati in FDM sono adatti per prototipi funzionali dettagliati, strumenti di produzione durevoli e parti di produzione a basso volume. Tra i principali settori in cui trova applicazione la tecnologia Fused Deposition Modelling, menzioniamo: automobilistico, manifattura industriale, medicina, architettura, beni di consumo, moda, istruzione e ricerca.

## 2.3 Selective Laser Sintering (SLS)

### 2.3.1 Descrizione

La Selective Laser Sintering è una tecnica di Fabbricazione Additiva che venne sviluppata dall'Università di Austin. Questa tecnologia è una delle più diffuse sul mercato e si basa sul fondere, in maniera selettiva, polvere di materiale polimerico per mezzo di una sorgente laser; il materiale utilizzato è solitamente un polimero termoplastico definitivo, questo permette la realizzazione di componenti finiti, inoltre è l'unica tecnica che permette di saturare interamente il volume di lavoro lungo l'asse Z, consentendo la lavorazione di più componenti alla volta.

### 2.3.2 Processo di stampa

Il processo inizia con la deposizione di uno strato di polvere sulla piattaforma di lavoro cui segue il passaggio di un rullo per effettuare un livellamento della superficie. Successivamente una sorgente laser, di adeguata potenza, proietta un raggio laser che traccia sullo strato di polvere la sezione da realizzare così da portare a fusione le particelle polimeriche. Realizzata la sezione, l'elevatore fa abbassare la piattaforma di lavoro di un certo delta, permettendo nuovamente l'alimentazione della polvere e la successiva fusione.

Il processo prosegue in maniera continua fino al completamento della lavorazione, a quel punto avviene l'estrazione del componente e la successiva pulizia della polvere non portata a fusione.

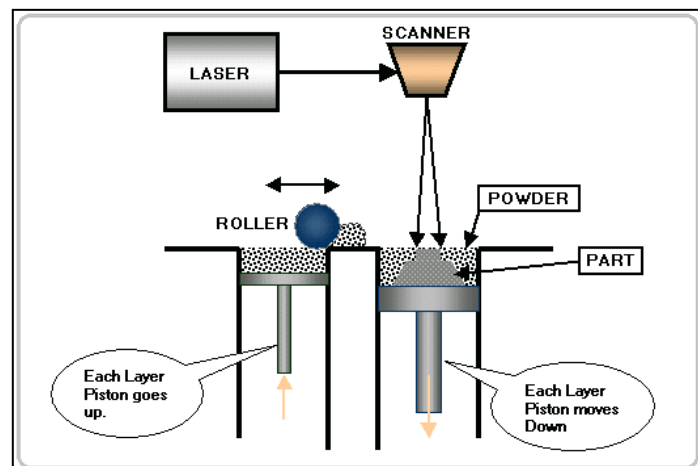
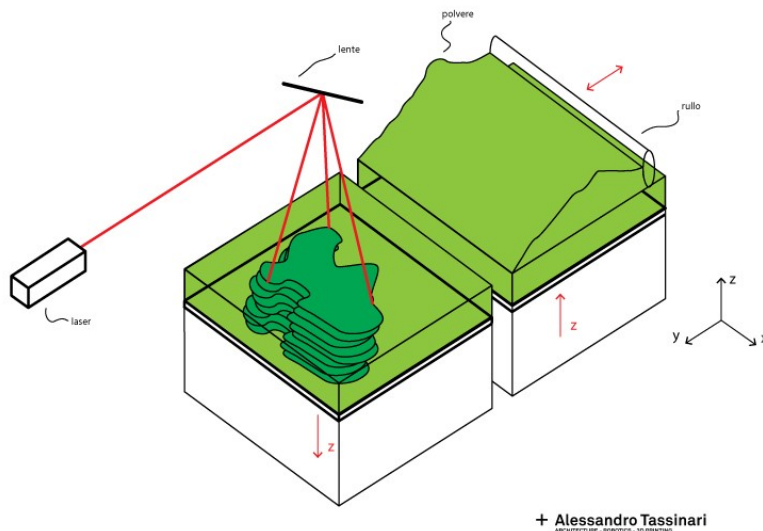


Figura2.3 -2.4: schema stampante SLS



Questa tecnologia ha la caratteristica di non utilizzare un materiale differente per il supporto, ma utilizza semplicemente la polvere non portata a fusione, infatti il componente realizzato non sprofonda in quanto le densità dei due elementi sono sostanzialmente le stesse. La possibilità di utilizzare la polvere come supporto permette la realizzazione di più componenti alla volta uno sopra l'altro, sfruttando così l'intero volume di lavoro lungo l'asse Z. Al fine di ottenere una lavorazione di qualità è necessario che la camera di lavoro venga preriscaldata ad una temperatura prossima a quella di fusione della polvere ed inoltre che operi sotto copertura di azoto, così da evitare l'ossidazione della polvere.

Preriscaldare la camera comporta ad avere ben due vantaggi:

- Ridurre il ritiro del materiale in fase di solidificazione, e la conseguente creazione di cavità di ritiro, in quanto questo dipende direttamente dallo sbalzo termico generato dal raggio laser.

- Ridurre la potenza necessaria erogata dal laser, quest'ultima ha un rendimento molto basso ed erogare una potenza elevata genererebbe un costo elevato.

Tuttavia, il preriscaldamento comporta che al termine della lavorazione il blocco formato da polvere e componente si trovi ad una temperatura molto elevata, quindi è necessario attendere che il blocco si raffreddi fino ai 30-40 gradi per procedere con la rimozione della polvere in eccesso, poiché svolgere tale operazione ad una temperatura alta provocherebbe il rischio di deformare il prodotto realizzato. La



rimozione della polvere, svolta manualmente, rende difficoltoso l'utilizzo di questa tecnica per una produzione industriale. La polvere in eccesso può essere riciclata e utilizzata in una nuova lavorazione se miscelata con della polvere nuova.



*Figura 2.5: processo di eliminazione della polvere dal pezzo stampato*

### **2.3.3 Macchine e Materiali**

Le macchine che utilizzano questa tecnologia hanno il vantaggio di non essere soggette ad usura, l'unica manutenzione necessaria riguarda la sorgente laser che va cambiata una volta esaurita. Sono due i principali fornitori sul mercato di macchine che utilizzano questa tecnologia: EOS e 3D Systems, a seconda del produttore si possono ottenere caratteristiche differenti.

I macchinari commercializzati da 3D Systems hanno le seguenti caratteristiche:

- Volume di lavoro: varia dai 381x330x460 mm, delle macchine più piccole, ai 550x550x750 mm delle macchine di più grande dimensione
- Spessore dello strato: compreso tra 0.08 e 0.15 mm
- Velocità di lavorazione: 1.8 l/h
- Sorgente laser utilizzata: C02 30W, per le macchine più piccole, C02 200 W, per le macchine di dimensioni maggiori

I materiali utilizzabili sono:

-CastForm: un polistirene utilizzabile per la produzione di modelli a cera persa nella microfusione.

-DuraForm: materiale corrispondente al Nylon 12, sono inoltre disponibili diverse varianti a seconda dell'aggiunta di vetro, alluminio o fibre di carbonio al fine di incrementarne le prestazioni.



**Figura2.6:** stampante 3d Systems sPro 230

*(i nomi di questi materiali vengono creati dall'azienda che li commercializza)*

Per quanto riguarda le macchine prodotte da EOS si riscontrano i seguenti parametri:

- Volume di lavoro: varia dai 200x250x330 mm, delle macchine più piccole, ai 700x380x560 mm delle macchine di più grande dimensione.
- Spessore dello strato: 0.06mm - 0.1mm - 0.12mm, le macchine di più grande dimensione sono in grado di realizzare solo quest'ultimo valore.
- Velocità di lavorazione: dai 7mm/h, per le macchine più piccole, fino ai 20mm/h per le macchine più grandi.
- Sorgente laser utilizzata: C02 30W, per le macchine più piccole, C02 50W, per le macchine di dimensioni maggiori.

Oltre al Nylon12 ed al polistirene, EOS offre altre due tipologie di materiali:

-Poliammide 11;

-PEEK HP3: materiale particolarmente interessante per applicazioni nel settore aerospaziale in quanto oltre a garantire elevate prestazioni meccaniche ha una temperatura di fusione molto elevata pari a 372°C.

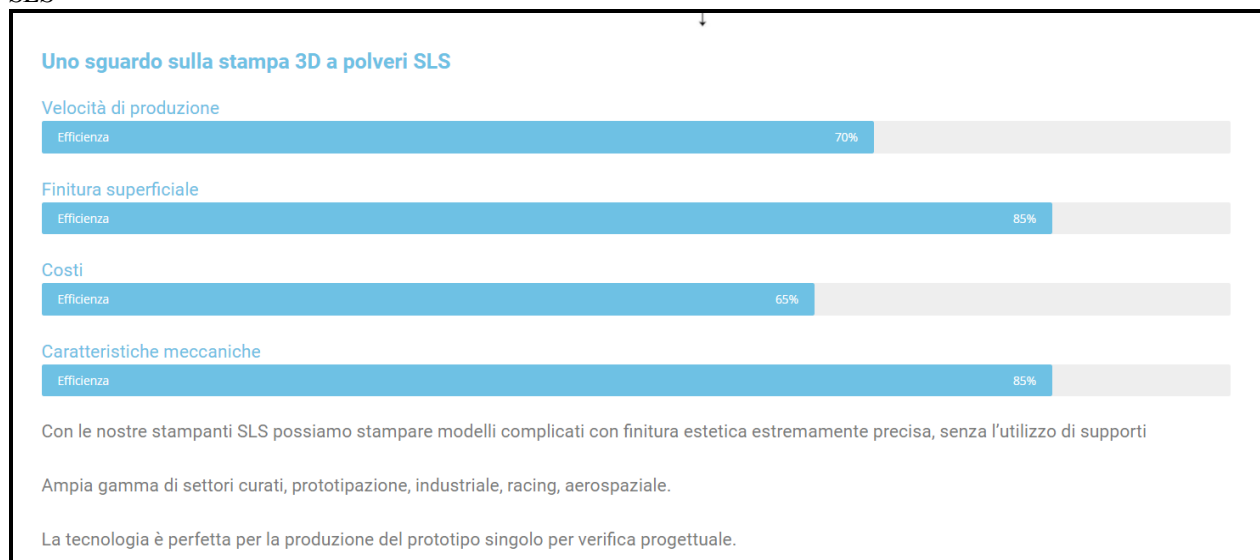


**Figura2.7:** stampante EOS M 400

### 2.3.4 Vantaggi e Svantaggi

Ricapitolando quanto detto nella descrizione del processo, i principali vantaggi di questa tecnologia sono: la possibilità di realizzare componenti in materiali termoplastici definitivi, l'elevata produttività, l'assenza di materiale differente per i supporti, la possibilità di lavorare sull'intero volume della camera di lavoro. La Selective Laser Sintering, inoltre, permette di aggiungere nuovi componenti da realizzare a lavorazione già avviata, questa caratteristica unica assicura una notevole flessibilità e la possibilità di eseguire parallelamente ordini di fabbricazione pervenuti ad istanti temporali differenti. I limiti che è possibile riscontrare sono sostanzialmente due: la ridotta gamma di materiali disponibili (solamente due) ed i lunghi tempi necessari ad eliminare la polvere in eccesso dal prodotto finito ed a pulire accuratamente l'intera camera di lavoro tra una lavorazione e l'altra.

**Figura 2.8:** caratteristiche stampa SLS



## 2.4 Stereolitografia (SLA)

### 2.4.1 Descrizione

La stereolitografia (SLA) è un processo di produzione additivo che appartiene alla famiglia della Vat Photopolymerization. A differenza dei processi sopra descritti, esso utilizza il processo di fotopolimerizzazione per la creazione dei componenti.

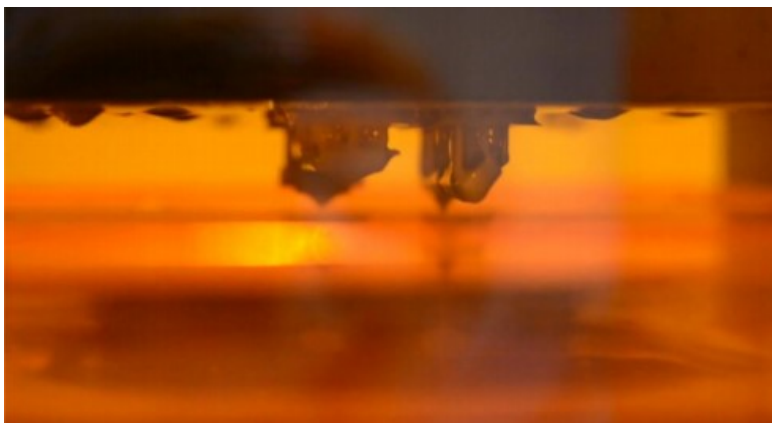
La fotopolimerizzazione è una tecnica che utilizza la luce (visibile o ultravioletta; UV) per creare una reazione chimica che fa in modo che un materiale liquido chiamato polimero diventi solido attraverso un "processo di indurimento" (curing).

### 2.4.2 Processo di stampa

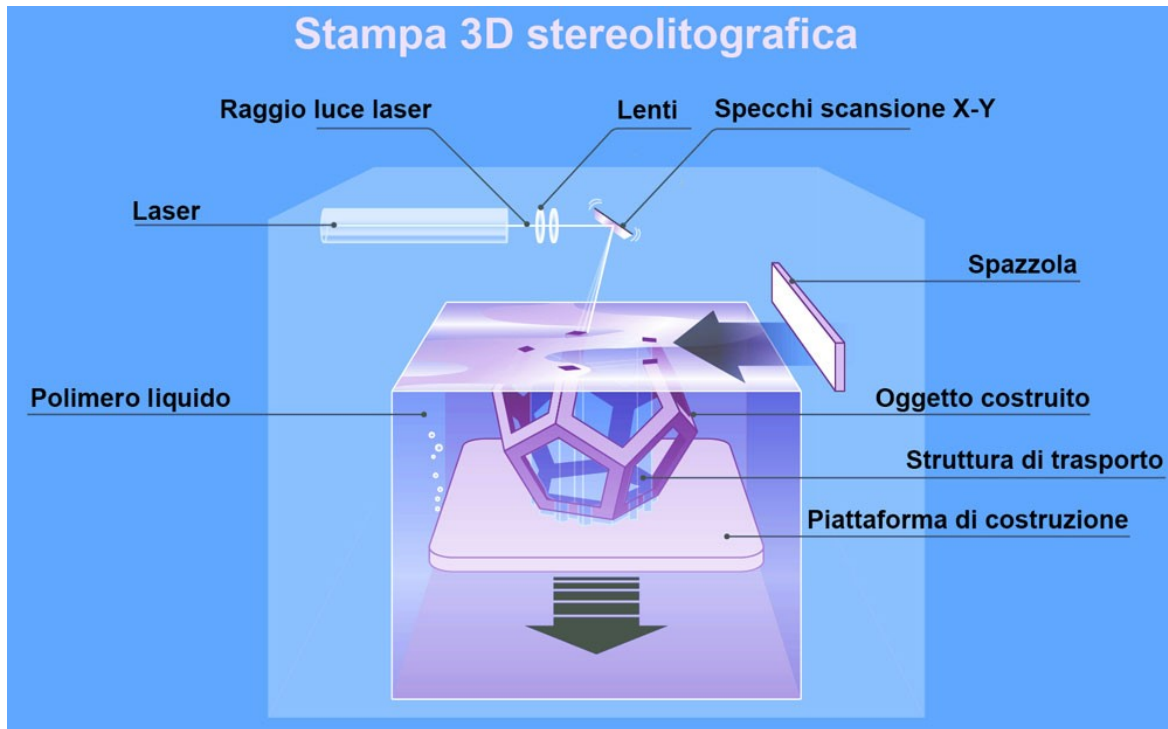
Nella piattaforma di costruzione della macchina viene dapprima riempito il serbatoio dal polimero liquido in relazione all'altezza dell'oggetto che andremo a stampare.

Il laser solidifica la resina in corrispondenza delle sezioni utili dello strato (layer) corrente e una volta completato il processo, dopo il passaggio della macchina che elimina la resina in eccesso, la piattaforma di costruzione viene abbassata e si ripete l'operazione finché il componente non è ultimato. La stereolitografia richiede strutture di supporto per sporgenze, che sono costruite nello stesso materiale e che vengono rimosse a fine processo. Dopo la stampa, la parte si trova in uno stato non completamente polimerizzato e richiede ulteriore post-elaborazione sotto luce UV se sono richieste proprietà meccaniche e termiche molto elevate, il componente realizzato viene quindi trattato in un forno UV per una solidificazione completa della resina.

Per migliorarne la finitura superficiale le parti ottenute da SLA possono essere rifinite utilizzando vari metodi di post-lavorazione come levigatura, lucidatura, verniciatura a spruzzo e finitura con un olio minerale.



*Figura 2.9: macchina SLA durante lo stampaggio*



*Figura2.10: schema macchina SLA*

### 2.4.3 Macchine e Materiali

Nel 2011, Formlabs adattò l'SLA con apparecchi desktop. La stereolitografia di piccolo formato portò la stampa 3D ad alta risoluzione, precedentemente limitata dai sistemi monolitici industriali, in una configurazione molto più piccola e accessibile con un'ampia gamma di materiali di stampa. Queste nuove capacità espansero l'accesso alla stampa 3D per una varietà di applicazioni personalizzate e di alta precisione in diverse discipline, inclusa l'ingegneria, il design di prodotto, la produzione, il settore dentale, dell'oreficeria e molti altri.

Nel 2015, Formlabs ha lanciato la Form 2, stampante SLA di nuova generazione che è diventata la stampante 3D desktop leader del settore, con parti stampate in vari campi.

In genere per questa tecnica di stampa 3D vengono utilizzate resine epossidiche che, a scapito di caratteristiche meccaniche modeste, hanno buone proprietà di trasparenza e consentono una buona cura del dettaglio.



*Figura2.11: stampante Form 2 di Formlabs*



#### 2.4.4 Vantaggi e Svantaggi

Tra i vantaggi di questa tecnologia si cita l'accuratezza raggiungibile e l'ottima finitura superficiale ottenibile, a fronte di scarse proprietà meccaniche, una modesta durabilità del prodotto, dei costi elevati, sia della stampante che della resina.

Le stampanti 3D SLA possono essere leggermente più lente poiché la polimerizzazione di uno strato diventa un percorso che il laser deve percorrere in un modo o nell'altro. Più grande o complesso è l'oggetto da stampare, più tempo impiegherà il laser per completare un singolo strato.

Durante lo stampaggio può esserci il problema del "curling" dovuto dall'effetto di ritiro della resina durante la solidificazione. Quando il ritiro è considerevole, si sviluppano grandi tensioni interne tra il nuovo strato e il materiale precedentemente solidificato, che si traduce in deformazione della parte.

Un ultimo svantaggio è legato all'utilizzo delle resine che molto spesso sono tossiche e durante lo stampaggio possono indurre problemi sia nell'operatore che nell'ambiente circostante.

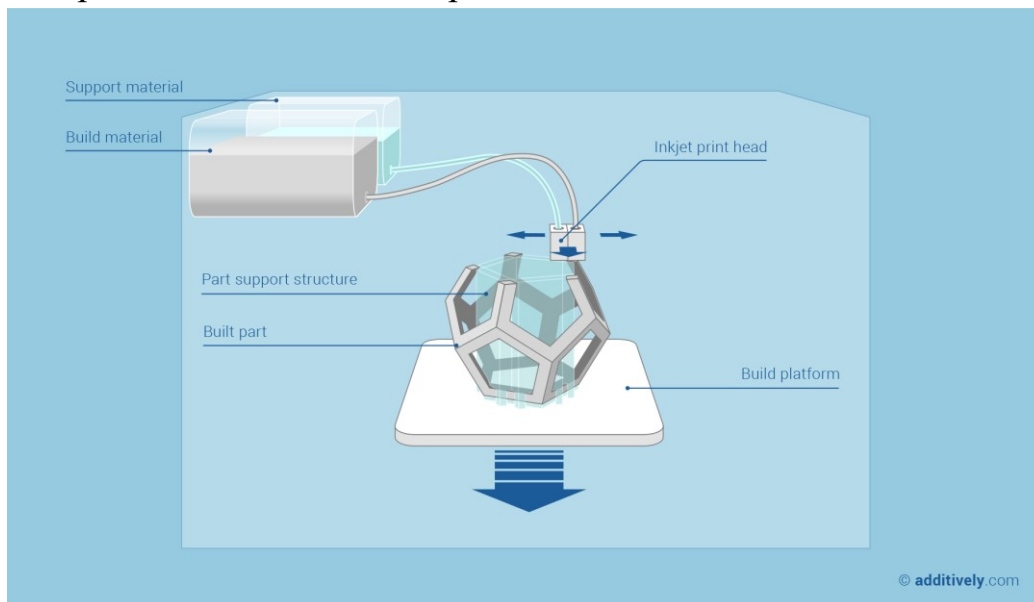


*Figura 2.12: alcuni elementi stampati in sla*

## 2.5 Material Jetting (MJ)

### 2.5.1 Descrizione

La tecnica del “Material jetting” è concettualmente simile ai tradizionali processi di stampa 2D a getto d’inchiostro: una testina di stampa rilascia il materiale fotosensibile che solidifica grazie ad un fascio UV. Il processo avviene strato su strato, mentre la piattaforma mobile si abbassa fino a componente ultimato. Prima della stampa vera e propria, la resina viene preriscaldata ad una temperatura di circa 60°C per fare in modo che abbia una viscosità tale da poter essere stampata. Una testa a getto d’inchiostro, rilascia selettivamente il materiale sotto forma di minuscole gocce su una piattaforma di stampa. Il materiale, preriscaldato, viene fatto solidificare tramite l’applicazione di energia, solitamente sotto forma di raggi UV o sotto forma di calore. Alla fine dello strato la piattaforma si abbassa di una distanza pari allo spessore di uno strato, che ne definisce la risoluzione lungo l’asse Z. Questa tecnologia richiede l’utilizzo di supporti, quindi le parti sono normalmente supportate da un materiale solubile che viene depositato contemporaneamente al materiale di cui è composta la parte. Dopo la stampa è necessario rimuovere i supporti, costituiti da materiale solubile, immergendo la parte in acqua o altri solventi. In alcuni casi è necessario proteggere le parti stampate con una vernice trasparente anti UV.



**Figura2.13:** schema stampante MJ

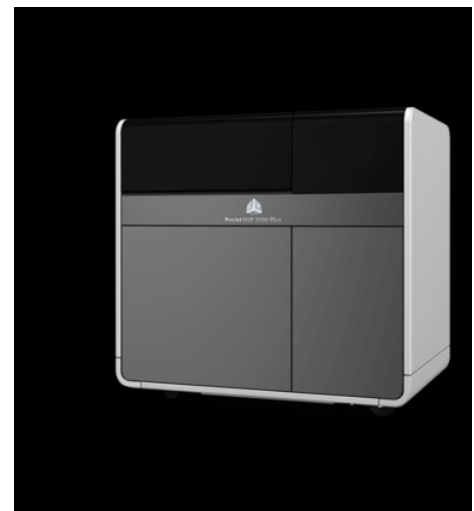
### 2.5.3 Macchine e Materiali

Le macchine per questo tipo di stampa sono commercializzate solamente da un'unica azienda chiamata 3D Systems la quale presenta anche il brevetto di questa tecnologia di stampa.

Queste macchine permettono la stampa di parti rigide ed elastomeriche di precisione con accuratezza fedele al CAD, finitura superficiale superiore e fedeltà dei bordi di alta qualità per veri test funzionali.

Utilizzano un'ampia gamma di materiali rigidi disponibili da trasparenti a diversi colori opachi, nonché materiali con proprietà che imitano le plastiche tecniche, gli elastomeri e con resistenza alle alte temperature, generalmente utilizza fotopolimeri termoindurenti (es. acrilici) allo stato liquido (simili al processo SLA).

Durante la stampa l'altezza dello strato depositato è legata allo specifico materiale, a causa della complessità fisica della formazione di gocce. In genere l'altezza tipica dello strato utilizzata nel Material Jetting è di 16- 32  $\mu\text{m}$ . L'MJ è considerato inoltre una delle tecnologie di stampa 3D più accurate con una precisione dimensionale del  $\pm 0,1\%$ .



*Figura 2.14: stampante Projet 2500 plus*

### 2.5.4 Vantaggi e Svantaggi

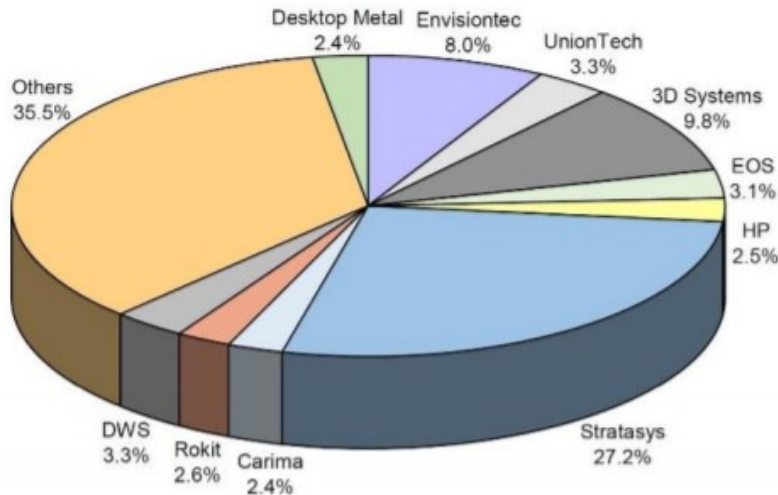
Si riscontra una buona accuratezza e un'ottima finitura superficiale. Si possono inoltre realizzare parti in multi-materiale con un ampio spettro di materiali disponibili (ABS, gomma, materiali trasparenti).

La deformazione può verificarsi, ma non è comune come in altre tecnologie come FDM o SLS, perché la stampa avviene a temperature prossime a quella ambientale. Se analizziamo il livello economico della stampa, la macchina, le resine e la manutenzione rappresentano un notevole impegno finanziario per le imprese, che viene però ripagato dalla elevata precisione e velocità della stampa.



## 2.6 Grafici sviluppo stampa 3D

Diamo ora uno sguardo sullo sviluppo di queste macchine nel mondo inserendo alcuni grafici riassuntivi che possono darci un'idea dello sviluppo del settore delle stampanti 3D.



*Figura 2.15: grafico a torta dell'importanza delle aziende nel settore AM*

Il grafico a torta mostra in maniera molto chiara l'importanza delle aziende produttrici di stampanti 3D nel mercato. Ad occhio si nota subito il dominio della Stratasys e 3D Systems in quanto sono proprio esse le principali costruttrici di macchine e di commercializzazione dei materiali per la stampa, nonché detentrici dei brevetti di diverse tecnologie di stampa.

TABLE I. DENSITY OF MAIN 3D PRINTER COMPANIES

Country	Population	3D Printer Companies	Density 3D Printer Companies (x10 <sup>9</sup> )	High tech country rank
USA	324,459,463	11	33.90	2
Germany	82,114,224	5	60.89	3
China	1,409,517,397	3	2.13	1
Italy	59,359,900	2	33.69	17
France	64,979,548	2	30.78	5
Ireland	4,761,657	1	210.01	14
Israel	8,321,570	1	120.17	18
Austria	8,735,453	1	114.48	n.a.
Netherlands	17,035,938	1	58.70	9
South Korea	50,982,212	1	19.61	6
UK	66,181,585	1	15.11	7
Japan	127,484,450	1	7.84	4

*Figura 2.16: confronto tra paesi che presentano il maggior numero di aziende che costruiscono stampanti (Fonte: Margiov, Stampare in 3d, 28/08/2018)*

## 2.7 Work-Flow dell'AM

Nel presente capitolo vengono esposti i principali passaggi che caratterizzano la progettazione e la realizzazione di componenti mediante tecnologie additive, alcuni di questi passaggi fondamentali verranno spiegati in seguito con dei capitoli dedicati.

Indipendentemente dal tipo di tecnologia additiva di cui si farà uso, il work-flow segue delle fasi che sono coincidenti per tutti i tipi di stampaggio.

L'immagine in seguito descrive molto bene le fasi necessarie per l'ottenimento del componente finale e ci permette di ordinare in modo temporale tutti i step necessari. (figura 2.17)

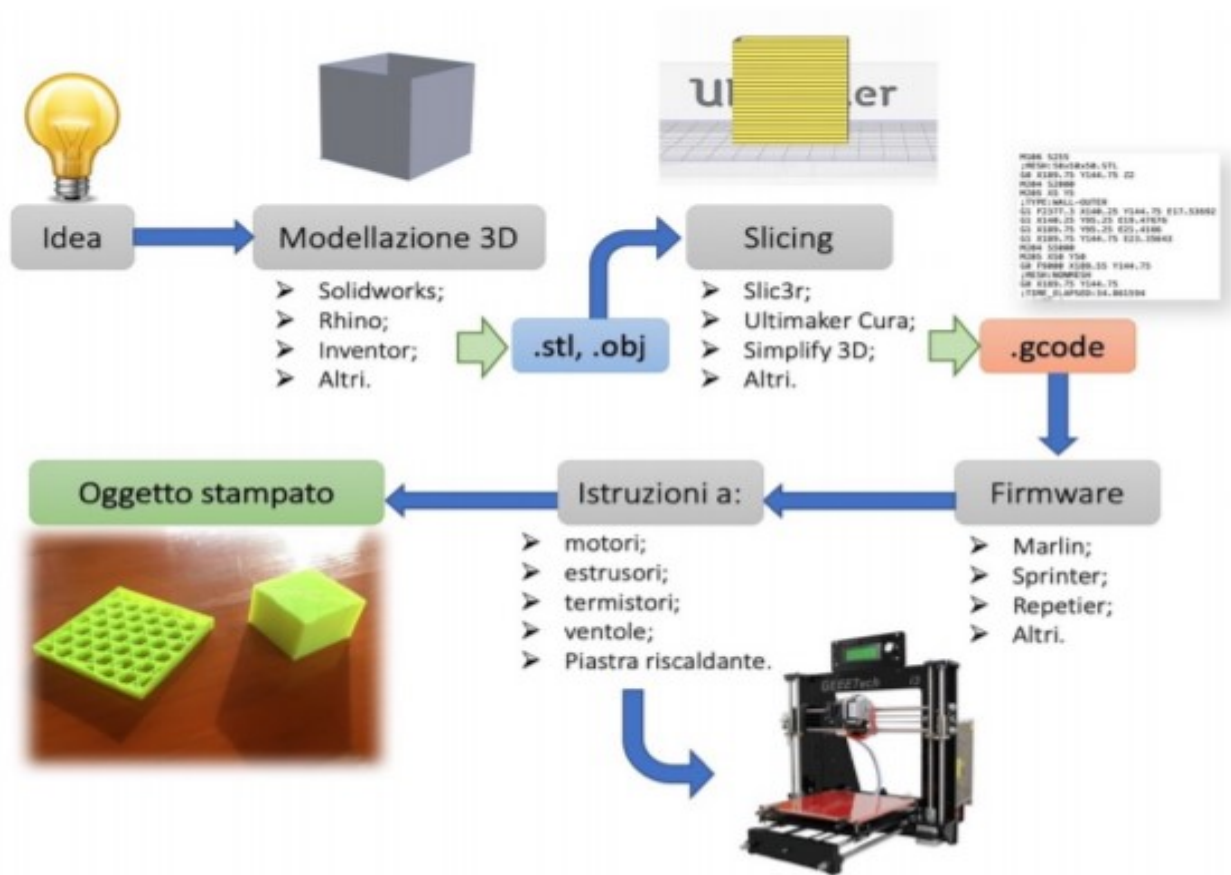


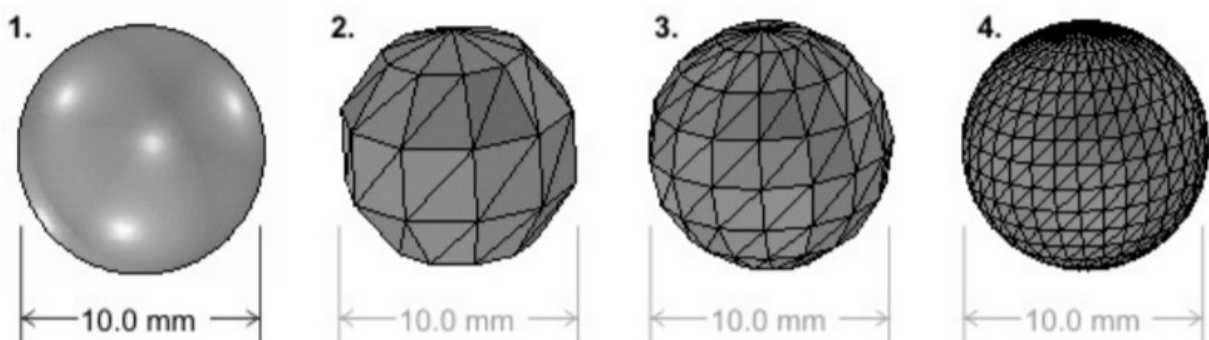
Figura 2.17

## 2.8 Modellazione 3D e creazione file .Stl (Solid to Layer)

La fase iniziale, che segue l'idea, si concretizza nella definizione di un bozzetto, uno sketch quotato dove vengono indicate le dimensioni principali e la forma dell'oggetto. Da questo si passa alla modellazione CAD mediante l'uso di modellatori sviluppati appositamente per la modellazione di tipo 3D, al fine di ottenere un modello matematico del pezzo che si vuole realizzare.

Già a partire da questa fase, il progettista deve avere in mente il tipo di macchina che utilizzerà per lo stampaggio, in quanto per ogni singolo processo esso dovrà esaminare delle considerazioni e affrontare delle difficoltà differenti.

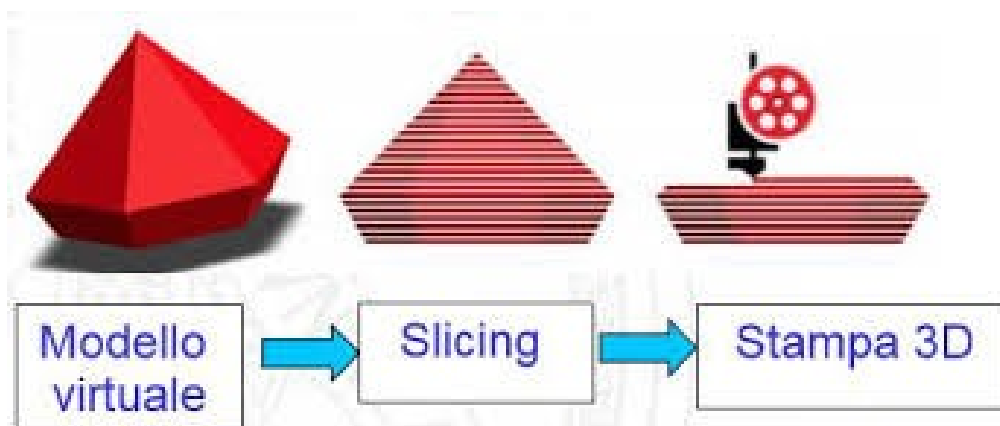
Successivamente il file CAD viene convertito in un file STL, un formato di file di produzione additivo standard. La conversione genera un solido la cui superficie è stata approssimata da triangoli e stabilisce delle coordinate X, Y e Z ripetute per ciascuno dei tre vertici di ciascun triangolo e di un vettore per descrivere l'orientamento della normale per ciascuna superficie. La qualità della stampa 3D è legata per sua stessa natura al grado di dettaglio del reticolo di triangoli, dato che un numero maggiore di triangoli fornisce una descrizione maggiore del modello e quindi più informazioni vengono comunicate al software incaricato di trasformare la geometria in movimenti macchina.



*Figura 2.18: conversione di un file Cad al file step (da sx a dx) , aumentando il grado di dettaglio*

## 2.9 Fase dello Slicing

Il formato STL è largamente utilizzato come input nei software di “slicing” appositamente progettati per la stampa 3D. Uno slicer è un applicativo software necessario alla trasformazione di un modello tridimensionale virtuale in una serie ordinata di istruzioni da inviare alla macchina per la realizzazione del componente. Lo slicer provvede a generare il percorso che dovrà fare l’ugello e definisce la quantità di materiale da estrarre durante il percorso, nonché informazioni secondarie come le temperature a cui lavorano gli estrusori e la piastra riscaldante, la velocità di rotazione delle ventole, i settaggi dello “zero macchina”. Essendo la stampa 3D una tecnologia additiva che opera strato su strato dal basso verso l’alto fino al completamento della stampa, lo slicer taglia “a fette” il modello, secondo il parametro “layer height” imposto nella fase preliminare del processo di slicing. Questo valore rappresenta la distanza tra i piani (layer) del file step, che sono stati affettati dal software slicer. Minore sarà questo parametro e più le superfici quando verranno stampate mostreranno meglio i particolari e i dettagli dell’oggetto e otterremo anche una rugosità minore.



*Figura 2.19: esempio di fase slicing*

## 2.10 Scrittura del Gcode

Il Gcode è un tipo di linguaggio macchina, che viene scritto dal programma slicer e che serve per andare a dare tutte le indicazioni al software presente nella stampante 3D su come muovere l'estrusore per la realizzazione del pezzo. Come struttura è assimilabile a quella utilizzata nelle macchine CNC, infatti presenta lo stesso tipo di denominazione delle operazioni. Le istruzioni sono caratterizzate da una lettera (es G, M, F, S...) e da un numero che può essere identificativo del comando

specifico (per esempio G0, movimento a vuoto) o di una quantità (per esempio F9000, velocità di avanzamento impostata a 9000 mm/min). Le coordinate degli spostamenti nel volume di stampa vengono definite da istruzioni del tipo X50 Y50 e sono, in questo caso, assolute, ossia definiscono la coordinata assoluta della testina rispetto allo zero macchina.

Con il comando E seguito dal rispettivo numero invece si può andare a modificare il "layer height" in modo da regolare anche la quantità di materiale depositata ad ogni strato.

```
26 ;Layer count: 336
27 ;LAYER:0
28 M107
29 G0 F9000 X91.800 Y93.520 Z0.300
30 ;TYPE:SKIRT
31 G1 F1200 X92.617 Y92.870 E0.01964
32 G1 X93.518 Y92.412 E0.03865
33 G1 X94.458 Y92.141 E0.05705
34 G1 X95.218 Y92.072 E0.07141
35 G1 X95.998 Y92.064 E0.08608
36 G1 X96.894 Y92.071 E0.10294
37 G1 X98.900 Y92.070 E0.14067
38 G1 X100.514 Y92.071 E0.17103
39 G1 X101.565 Y92.065 E0.19080
40 G1 X102.277 Y92.081 E0.20420
41 G1 X102.421 Y92.091 E0.20691
42 G1 X103.374 Y92.066 E0.22484
43 G1 X103.774 Y92.065 E0.23237
44 G1 X104.490 Y92.070 E0.24584
45 G1 X106.878 Y92.069 E0.29076
```

*Figura 2.20: esempio di un Gcode utilizzato per lo stampaggio in Fdm*

## 2.11 Stampaggio del componente

Il Gcode viene elaborato dal firmware presente nella stampante che con altissima velocità legge il codice e di conseguenza regola il processo, andato a muovere dove necessario l'estrusore e la quantità di materiale da inviare, esso gestisce anche dei parametri secondari del processo come: la velocità di traslazione dell'estrusore e della piastra, la temperatura della piastra e del filamento e la velocità di rotazione delle ventole.

## 2.12 Post-Processing

Il componente ottenuto, per l'estrazione dalla macchina deve essere aiutato da un operatore che provvederà a rimuoverlo appositamente.

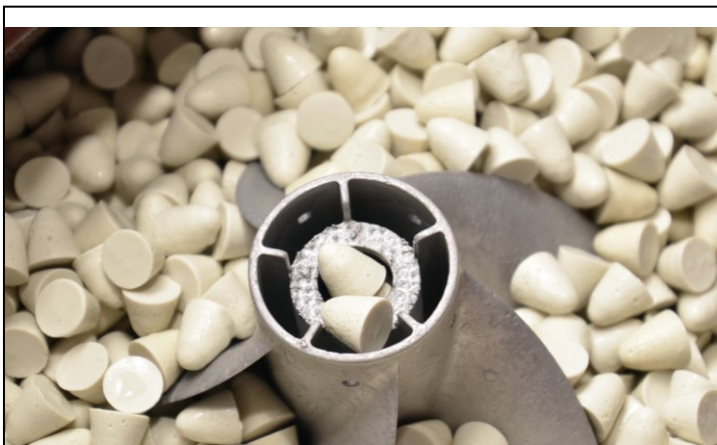
Raramente il componente uscito dalla stampa è pronto per essere utilizzato, infatti necessità di alcune fasi che ne consentono l'utilizzo futuro, migliorandolo sia a livello estetico che favorendone le proprietà meccaniche desiderate.

Generalmente si inizia con la fase di asportazione dei supporti necessari per la realizzazione del pezzo stesso, questo processo può essere svolto sia dall'operatore tramite dei appositi utensili o per dissoluzione in solventi, oppure da una macchina specifica che svolge la mansione. L'esistenza e la difficoltà di questa fase dipende da innumerevoli fattori come: materiale utilizzato, la tecnologia di stampa, il software di progettazione, etc.

Il componente viene successivamente ripulito di tutte le impurezze create durante il processo sulla sua superficie mediante delle apposite operazioni che ne migliorano la finitura come: levigatura, lucidatura pulizia ad ultrasuoni, sabbiatura, o persino la pallinatura per andarne a aumentare la durezza superficiale qualora servisse.

Per l'ultima fase il componente viene rivestito con dei appositi rivestimenti sulla superficie per aumentarne la durata tramite apposite vernici e resine specifiche.

*Figura 2.21: rimozione componenti appena stampato in sls*



*Figura 2.22: burattatura superficiale di un componente stampato*



## 2.13 Software Utilizzati

In questo paragrafo andremo ad enunciare e descrivere le tipologie di software che sono stati utilizzati per la progettazione e per il calcolo dei costi nell'attività di tirocinio considerata e che vengono tutt'ora utilizzati dai progettisti durante il loro lavoro.

In seguito ci limiteremo a spiegarne il funzionamento e le caratteristiche, solo successivamente andremo a descrivere come sono stati utilizzati da noi tirocinanti in applicazioni ben specifiche.

### 2.13.1 LeanCost

LeanCost è un software sviluppato da una importante software house italiana chiamata HyperLean, leader nello sviluppo di software innovativi a supporto della configurazione, progettazione e preventivazione di tempi e costi di prodotti meccanici in diversi settori come: macchine automatiche, carpenteria, automazione, automotive, oil e gas, aerospaziale, difesa e lavorazioni meccaniche conto terzi.

Il software considerato, permette di generare preventivi rapidi e accurati a partire da un qualsiasi modello 3D, presente sul mercato. Ciò riduce i tempi dedicati alla preventivazione, consentendo di rispondere più rapidamente alle richieste di offerta da parte dei clienti.

LeanCost riconosce automaticamente la geometria del modello Cad 3D e ne associa un ciclo di lavorazione. Esso importa automaticamente i costi di materie prime, componenti commerciali e centri di costo presenti nel gestionale, fornendo come output una stima oggettiva di tempi e costi di produzione.

Ciò consente di scegliere la migliore strategia produttiva, confrontando scenari alternativi in funzione delle quantità, delle disponibilità delle macchine e della

fattibilità, permette anche la individuazione del diagramma costi/quantità e calcola il lotto da produrre più economico.



*Figura 2.24: schermata LeanCost*



*Figura 2.23: logo del software LeanCost*

### 2.13.2 Solid Edge

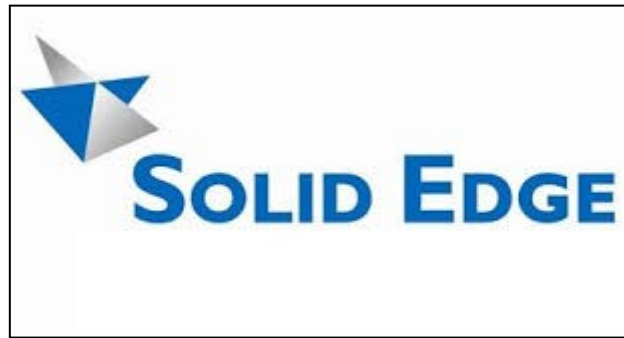
Solid Edge (SE) è un software di modellazione 2D/3D feature-based, realizzato da Siemens PLM Software ed è utilizzato nello sviluppo e realizzazione di prodotti in ogni settore tecnologico. Permette di modellare componenti singoli in modalità

sincrona o ordinata, oppure di creare assiemi più complessi attraverso la

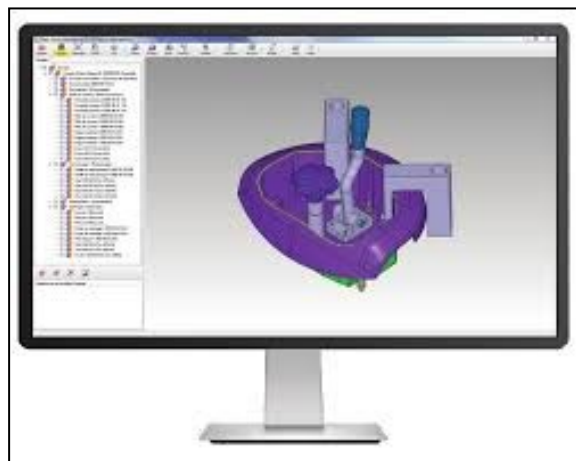
definizione di relazioni di vincolo statico o cinematico. Offre comandi di gestione dei dati e di messa in tavola di parti e assiemi (anche in visualizzazione esplosa). Esso consente di gestire tutti gli aspetti del processo di sviluppo prodotto, ovvero progettazione 3D, simulazione, produzione, gestione di dati. Grazie alla tecnologia sincrona, Solid Edge combina la velocità e la semplicità della modellazione diretta con la flessibilità e il controllo offerti dalla progettazione parametrica.

Grazie ai suoi moduli aggiuntivi il software permette di essere utilizzato in tutte le fasi della creazione di componenti in moltissimi settori come nel meccanico, elettromeccanico e perfino per la progettazione impiantistica.

I moduli aggiuntivi permettono anche di effettuare simulazioni e analisi computazionali e di andare a ottimizzare la manifattura di un prodotto per un determinato processo di produzione come ad esempio per la tecnologia additiva.



*Figura 2.25: logo Solid Edge*



*Figura 2.26: schermata assieme in Solid Edge*



### 2.13.3 Ultimaker Cura

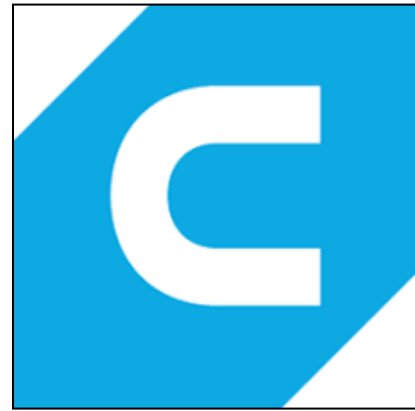
Cura è un'applicazione di slicing open source per la stampa additiva impiegato da Ultimaker, un'azienda produttrice di stampanti 3D.

Ultimaker Cura funziona suddividendo il file del modello dell'utente in livelli e generando un Gcode specifico per la stampante. Una volta terminato, il g-code può essere inviato alla stampante per la fabbricazione dell'oggetto fisico.

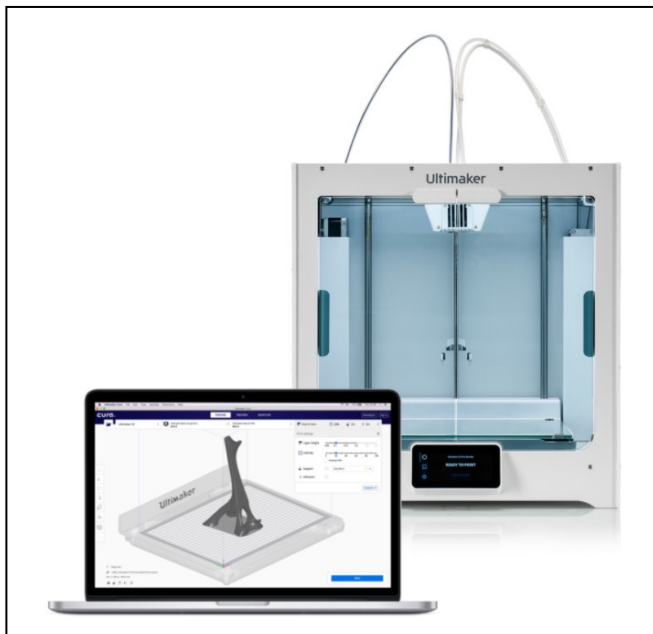
Il programma è libero e compatibile con qualsiasi stampante, ma è ottimizzato per la linea di stampanti Ultimaker ed a seconda di quale versione si utilizza, ha alcune caratteristiche interessanti e uniche. Dispone di una ampia vista 3D con un sacco di opzioni da esplorare (e se usate le impostazioni avanzate ancora di più). Il programma utilizza il proprio slicer chiamato CuraEngine ed può importare files in moltissime estensioni: .stl, .obj, .amf e .d.

Esso è molto facile ed intuitivo e permette anche a chi è alle prime armi con questa tipologia di software di entrare subito nel meccanismo che lo compone ci permette di avere una visione totale sul processo in atto.

L'unica imperfezione del programma è nella stima del tempo necessario allo stampaggio che generalmente viene sottostimato o è riferito solamente alla categoria di macchine Ultimaker.



*Figura 2.28: logo software Cura*



*Figura 2.29: schermata del software con stampante Ultimaker dedicata*

# Capitolo 3: Caso di Studio

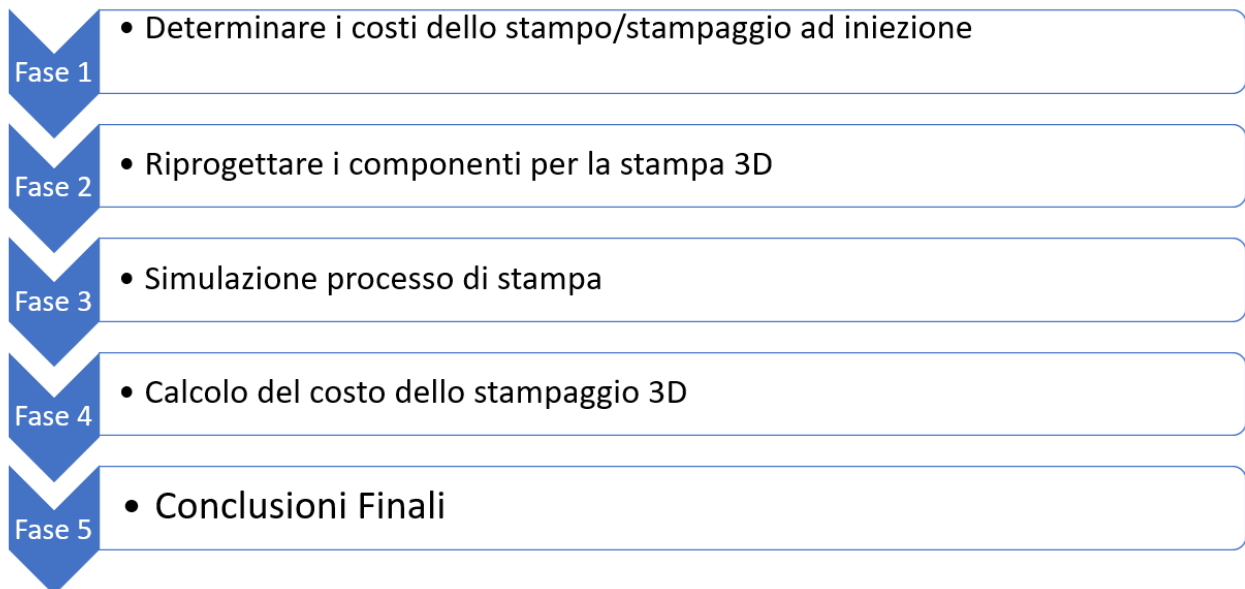
---

## 3.1 Introduzione

Entriamo ora più nello specifico dell'attività di tirocinio che abbiamo svolto, ricordando lo scopo principale di essa, ovvero andare a valutare l'uso e la convenienza economica della tecnologia AM per lo stampaggio di componenti in plastica presenti nelle macchine da caffè professionali costruite e sviluppate dalla Nuova Simonelli.

Per prima cosa andiamo a presentare i componenti che sono stati oggetto di studio che ci sono stati forniti dall'azienda stessa e utilizzati nei loro prodotti.

In seguito andremo ad spiegare tutte le fasi che posso essere riassunte nella *figura 3.1* nei successivi capitoli.



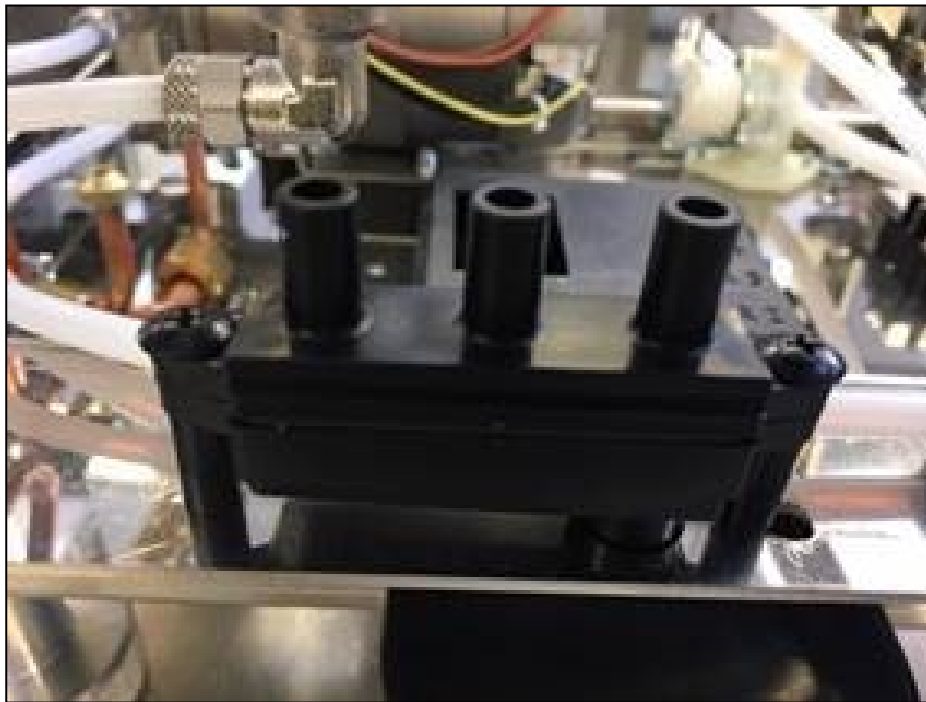
*Figura 3.1*

### **3.2 Collettore di scarico Inferiore/Superiore**

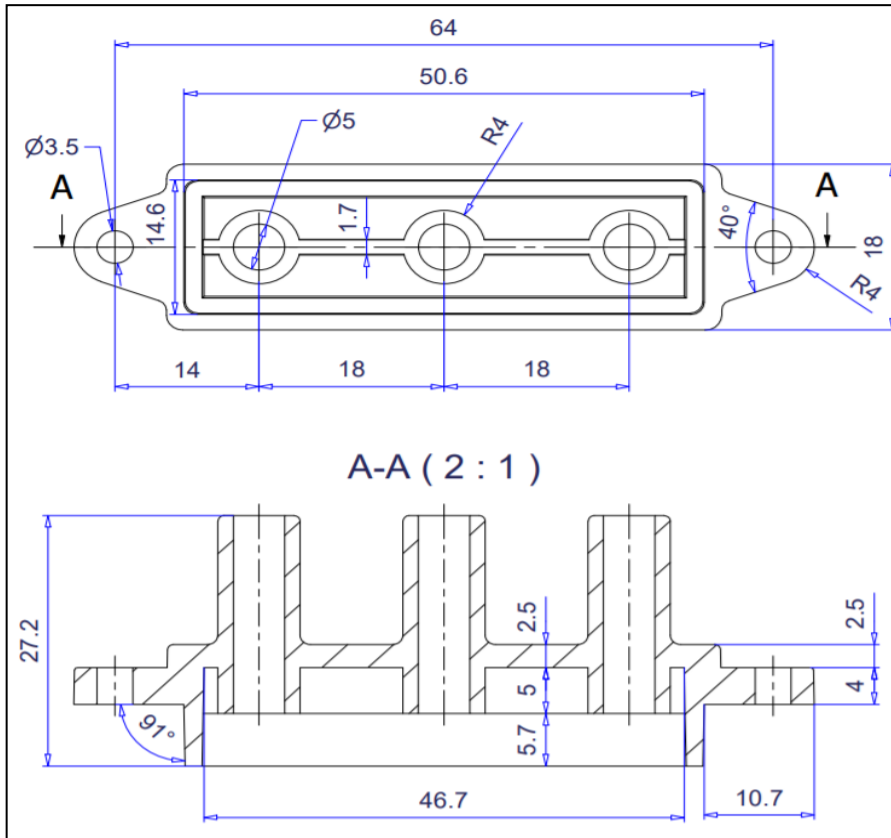
Lo scopo principale di questo componente è quello di raccogliere tutti gli scarti derivanti dalla produzione del caffè espresso come: acqua di scarico contenente caffè surriscaldata, vapore acqueo e polvere di caffè per poi inviarli allo scarico della macchina.

Esso è costituito da due parti, una inferiore e una superiore, unite tra loro mediante l'uso di una vite autofilettante che oltre a sigillare permette loro di essere vincolati sul telaio interno della macchina del caffè.

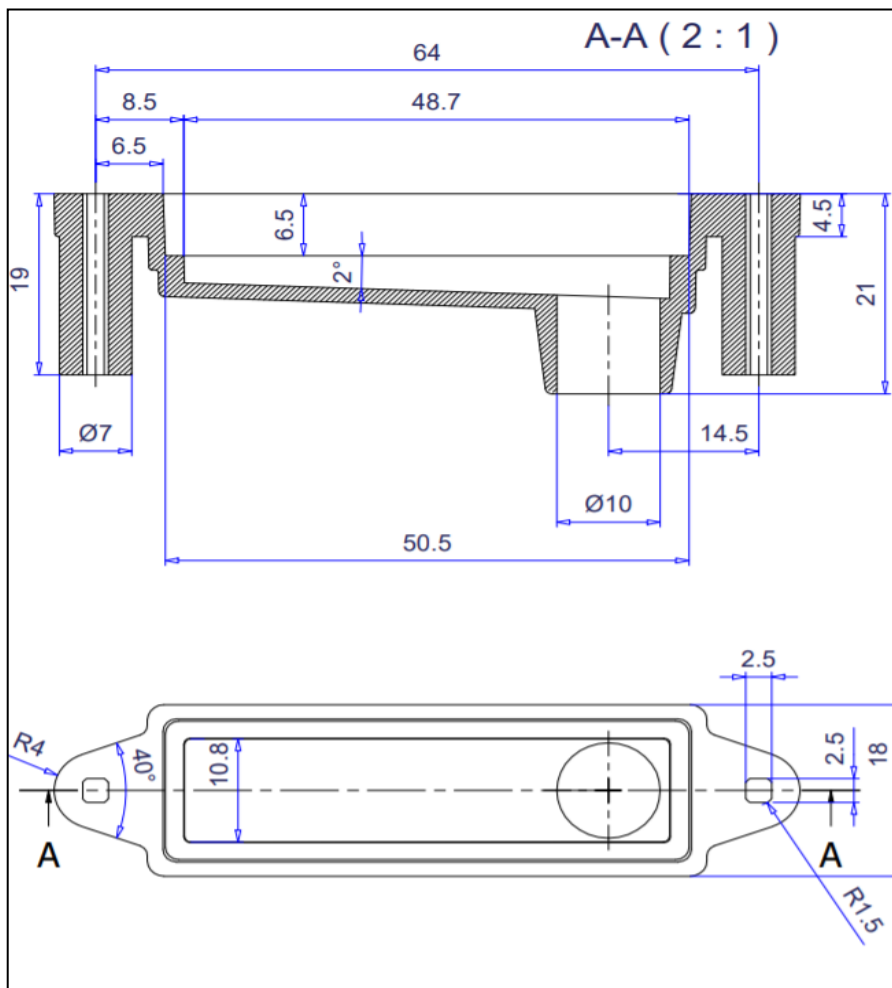
Entrambe le parti superiori e inferiori del componente sono ricavate dallo stampaggio ad iniezione in polipropilene.



*Figura 3.2: Collettore di scarico montato sul telaio della macchina*



**Figura 3.3:** Disegno tecnico del collettore superiore 05000670



**Figura 3.4:** Disegno tecnico del collettore inferiore 05000672

### 3.3 Calcolo costi stampaggio ad iniezione

Per potere andare ad eseguire una corretta valutazione economica della convenienza dell'AM per questi componenti, ci serviva una base di partenza su cui confrontarci. Nel caso in esame era necessario andare a calcolare i costi sostenuti dall'azienda per la produzione dei componenti con stampaggio ad iniezione su tutte le parti. Successivamente andremo a confrontarli con quelli realmente sostenuti dall'azienda in quanto il software utilizzato, anche se ben accurato, riesce solamente a darci una stima del costo dello stampo e dello stampaggio del componente.

Utilizzando i file Cad forniti dalla Nuova Simonelli, utilizzando il software LeanCost possiamo andare a preventivare i costi dello stampo, i costi del singolo componente stampato, e tutte le voci che ne conseguono il valore finale.

Una volta andate inserire gli input come:

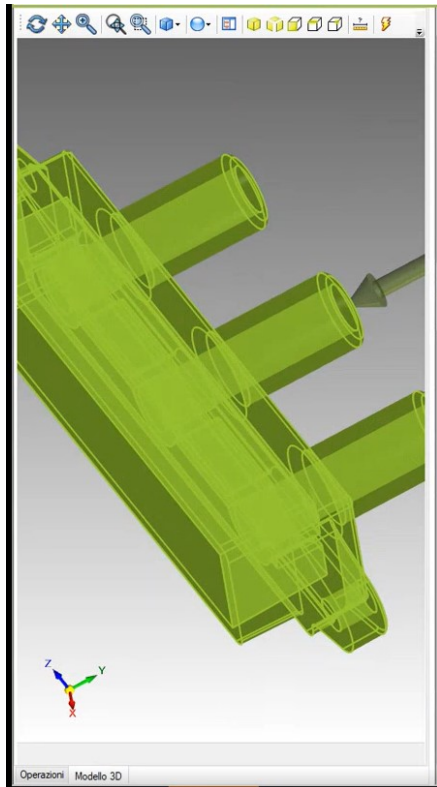
- File in formato .step;
- Materiale;
- Tolleranze;
- Definire se si tratta di un componente funzionale o estetico;
- Volume produttivo e lotti prodotti in un anno, forniti dall'azienda;

Il programma in automatico va a creare attorno il file che abbiamo inserito uno stampo ad iniezione necessario a produrlo. Lo stampo creato può essere personalizzato dal menù del programma, scegliendo il numero di cavità che si vogliono creare al suo interno, la pressione della pressa necessaria, il numero di estrattori, la tipologia di sistema ad iniezione e il materiale di cui è composto.

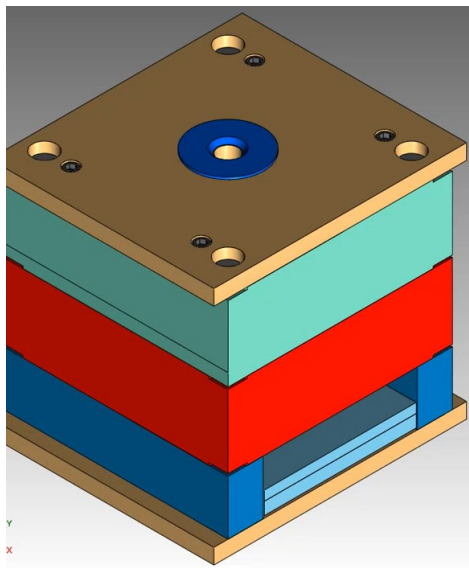
Il programma riesce a considerare anche le problematiche riferite al tipo di processo utilizzato e da materiale stampato, infatti, esso individua la direzione più consona per lo stampaggio del pezzo facendo minimizzare i sottosquadri in modo da garantire la riuscita del componente e semplificare la cavità.

In relazione alla tipologia di materiale utilizzato, LeanCost va a sovradimensionare le quote del componente per tenere conto delle possibili restrizioni durante il raffreddamento.

L'elevata personalizzazione del processo permette di andare a simulare in modo molto simile alla realtà lo stampaggio del componente, permettendoci di preventivare dei costi sulla falsariga di quelli sostenuti dalla Nuova Simonelli.



**Figura 3.5:** Direzione di stampa scelta del software per andare ad eliminare i sottosquadri



**Figura 3.6:** stampo ricavato dal file con LeanCost per il Copriresistenza

Il programma inoltre, crea una scheda tecnica dello stampo appena costruito in cui l'utente può andare a variare diversi parametri a seconda delle caratteristiche del tipo di pressa o del prodotto che desidera ottenere, il software in automatico varia i costi del processo in relazione alle modifiche apportate. (figura 3.7)

Nel nostro caso infatti per lo stampo del collettore abbiamo ipotizzato la presenza di 2 cavità sullo stesso stampo ( una per il collettore superiore e una per quello

inferiore oppure dello stesso componente superiore/inferiore), così facendo però la pressa da 50 tonnellate può non essere idonea per il processo, dovremo utilizzarne una con un pressione maggiore e quindi con un costo orario più elevato.

Volume in sottosquadro [mm <sup>3</sup> ]	0
Numero di regioni critiche per il raffreddamento	0
La matrice è realizzata a partire da un unico blocco di materiale	Vero
Il punzone è realizzato a partire da un unico blocco di materiale	Vero
Sovrametallo delle lastre grezze per matrice e punzone [mm]	8
Valore di sovradimensionamento della piastra di chiusura nella direzione della lunghezza [mm]	20
Valore di sovradimensionamento della piastra di chiusura nella direzione della larghezza [mm]	20
Altezza dei distanziali [mm]	100
Presenza del sistema di iniezione a canali caldi	Falso
Altezza della piastra del sistema a canali caldi [mm]	55
Dimensione base del vano di alloggio per il sistema di iniezione a canali caldi [mm]	55
Numero di punti di iniezione complessivi nello stampo	1
Numero di lame per la deviazione del flusso	3
Numero di estrattori	14
Dimensione grezza delle piastre in direzione della loro lunghezza (lasciare 0 se non noto) [mm]	0
Dimensione grezza delle piastre in direzione della loro larghezza (lasciare 0 se non noto) [mm]	0
Dimensione grezza delle piastre in direzione della loro profondità (lasciare 0 se non noto) [mm]	0
Lunghezza dell'area proiettata vista dall'asse X ortogonale all'asse stampo [mm]	78,8482931442261
Larghezza dell'area proiettata vista dall'asse X ortogonale all'asse stampo [mm]	55,0550530658765
Area proiettata vista dall'asse X ortogonale all'asse stampo [mm <sup>2</sup> ]	3143,56222488127
Lunghezza dell'area proiettata vista dall'asse Y ortogonale all'asse stampo [mm]	85,0403348655701
Larghezza dell'area proiettata vista dall'asse Y ortogonale all'asse stampo [mm]	55,0550530658765
Area proiettata vista dall'asse Y ortogonale all'asse stampo [mm <sup>2</sup> ]	3065,05593615337

*Figura 3.7*

Come vediamo in seguito la potenzialità del software sono molteplici, infatti dall'immagine 3.8, il programma ci permette di capire con chiarezza tutti i derivati del costo totale che esso considera e ci dà una stima del tempo di stampaggio di un singolo componente e dell'intero lotto di produzione da studiare.



**Figura 3.8:** scheda caratteristiche dello stampaggio considerato: volume produttivo 1000 pezzi, 200 pezzi per lotto.

Stampaggio a iniezione

Nome: Stampaggio a iniezione

Note:

Macchina: Pressa Iniezione 50 ton - 11,00 EUR/h (\*) Setup A

Quantità: 1

Fattore criticità: 0 %

Verificare i limiti macchina

Sovrascrivere con valori automatici

**Parametri geometrici**

Spessore massimo del componente	1,839	mm
Spessore medio del componente	1,370	mm
Volume del componente	17270,722	mm <sup>3</sup>
Area proiettata	4527,590	mm <sup>2</sup>
Larghezza dell'area proiettata	85,040	mm
Altezza dell'area proiettata	78,848	mm
Profondità del componente	55,000	mm
Fattore di cedevolezza	0,828	
Superficie non visibile dalla direzione di estrazione	0,000	mm <sup>2</sup>
Numero di sottosquadri	0,000	
Tolleranza più stringente sul componente	0,000	mm
Tipologia di componente	Technical	Scegli
Tipologia di colore del componente	Dark	Scegli
Finitura superficiale	Neat	Scegli

**Parametri tecnologici**

Numero di forme presenti nello stampo	1.000	1.000	cavità
<b>COSTO DELLA MATERIA PRIMA</b>		0,055	EUR
Costo unitario del materiale	2.450	2.450	EUR/kg
Volume totale (incluso il volume dei canali)		18,894	cm <sup>3</sup>
Volume canali di colata	1.623	1.623	cm <sup>3</sup>
Peso del componente (inclusi il peso dei canali e degli scarti)		0,022	kg
Peso del componente		0,020	kg
Peso dei canali di colata		0,002	kg
Presenza di sistema di iniezione a canali caldi	Not	Not	Scegli
Percentuale di scarto	4,000	4,000	%
Scarti di avviamento	2,000	2,000	pezzi
<b>COSTO DELL'OPERATORE</b>		0,020	EUR
Costo orario dell'operatore	25,000	25,000	EUR/h
Impegno dell'operatore alla macchina	20,000	20,000	%
<b>COSTO DEL PROCESSO DI STAMPAGGIO</b>		0,045	EUR
Tempo di processo per il ciclo completo di iniezione		13,442	s
Rendimento della macchina	95,000	95,000	%
TEMPO DELLA FASE DI INIEZIONE	0,784	0,784	s
Tempo di iniezione minimo conseguibile	0,112	0,112	s
Pressione di iniezione effettiva	88,900	88,900	MPa
Potenza della macchina	15,000	15,000	kW
Pressione di iniezione massima per il materiale	88,900	88,900	MPa
Massima pressione applicabile dalla macchina	209,000	209,000	MPa
TEMPO DI MANTENIMENTO E RAFFREDDAMENTO	7,763	7,763	s
Spessore da considerare nell'analisi	Maximum T	Maximum Thickn	Scegli
Diffusività termica del materiale	0,083	0,083	mm <sup>2</sup> /s

Tempo: 0,224 min      Tempo aggiornato:

Costo: 0,065 EUR      Costo aggiornato:

OK      Annulla



Una volta avviata l'analisi nel software, esso in automatico va ad analizzare tutti i fattori e le specifiche che abbiamo richiesto e in automatico va a costruire un grafico a torta in cui va ad enunciare tutte le voci che costituiscono il costo sia dello stampo necessario per il processo ma anche del singolo prodotto stampato e dell'intero volume di produzione.

Considerando il costo per lo stampo avente 2 impronte, il prezzo è leggermente lievitato ma comunque non abbiamo notato una proporzionalità tra il numero di cavità e il costo totale.

Questo perché nel caso del componente in questione la componentistica interna dello stampo è rimasta quasi invariata in quanto i canali di colata sono rimasti identici, mentre il numero dei estrattori è leggermente aumentato.

Ciò è derivato principalmente dal fatto che il componente presenta una geometria semplice, non contenente sottosquadri, con una piccola impronta che influisce molto poco sul costo finale.

Per i due componenti del collettore di scarico siamo andati a considerare diversi volumi produttivi in modo da poter preventivare diversi possibili scenari di produzione dell'azienda.

Una ulteriore differenza tra i due tipi di stampi è che nel caso considerassimo 2 impronte, anziché 1 per il collettore inferiore/superiore la pressa necessaria per il processo non aumenta in modo così consistente come nel caso dello stampo precedente, infatti passiamo da 50ton ad 80ton.

Anche in questo scenario il costo dello stampo aumenta di circa un 30% ma il costo del singolo componente stampato rimane pressoché invariato (aumenta solo del 7%), passando da 1,01€ ad 1.08€.

L'insieme dei dati raccolti dalle diverse analisi dei costi eseguite con LeanCost sono stati inseriti in un foglio di calcolo e analizzati in seguito per il confronto con i costi dello stampaggio 3d

### 3.4 Risultati dell'analisi

	Lotto	Volume produttivo	Cavità stampo	Costo materiale	Costo processo	Costo totale	Costo stampo	Costo stampo per pezzo	Costo totale con stampo
<b>Coll. Inf.</b>	600	3000	1	€ 0,01	€ 0,49	€ 0,50	€ 7.023,00	€ 2,34	€ 2,84
	1800	9000	1	€ 0,01	€ 0,40	€ 0,41	€ 7.023,00	€ 0,78	€ 1,19
	3000	15000	1	€ 0,01	€ 0,38	€ 0,39	€ 7.023,00	€ 0,47	€ 0,86
	3000	15000	2	€ 0,01	€ 0,23	€ 0,24	€ 10.610,00	€ 0,71	€ 0,95
<b>Coll. Sup.</b>	600	3000	1	€ 0,01	€ 0,62	€ 0,63	€ 7.390,00	€ 2,46	€ 3,09
	1800	9000	1	€ 0,01	€ 0,53	€ 0,54	€ 7.390,00	€ 0,82	€ 1,36
	3000	15000	1	€ 0,01	€ 0,51	€ 0,52	€ 7.390,00	€ 0,49	€ 1,01
	3000	15000	2	€ 0,01	€ 0,30	€ 0,31	€ 11.537,00	€ 0,77	€ 1,08

*Figura 3.9: tabella riassuntiva dei costi del collettore*

Con:

Costo Totale = Costo materiale + Costo Processo

Costo Stampo per Pezzo = Costo Stampo/Volume Produttivo

Costo Totale con Stampo = Costo Totale + Costo Totale con Stampo

Notiamo dalla tabella in *figura 3.9* che il Costo Stampo per Pezzo, soprattutto nella condizione di volume produttivo di 1000 pezzi, questo valore può arrivare ad essere ben 20 volte il Costo del Processo, ciò chiarisce come il costo dello stampo sia preponderante sui altri, soprattutto sul costo del processo.

Da questa osservazione è chiaro perché l'azienda ha richiesto il nostro studio per poter valutare l'uso della stampa 3d su questi componenti e per questi volumi di produzione relativamente bassi.

In seguito verranno mostrati i riepiloghi dei costi e dei tempi di stampaggio dei componenti per alcuni volumi specifici:

Materiale: Plastica - PP (polipropilene)

Peso [Kg]: 0,01

Quantità lotto: 600

Volume produttivo investimento: 3.000

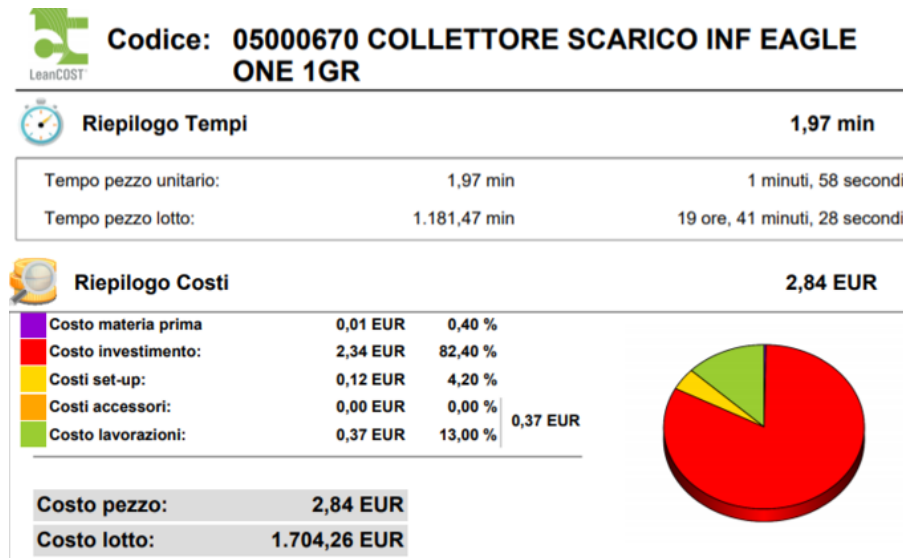


Figura 3.10: riassunto costi collettore di scarico inferiore

Quantità lotto: 600

Materiale: Plastica - PP (polipropilene)

Peso [Kg]: 0,01

Volume produttivo investimento: 3.000

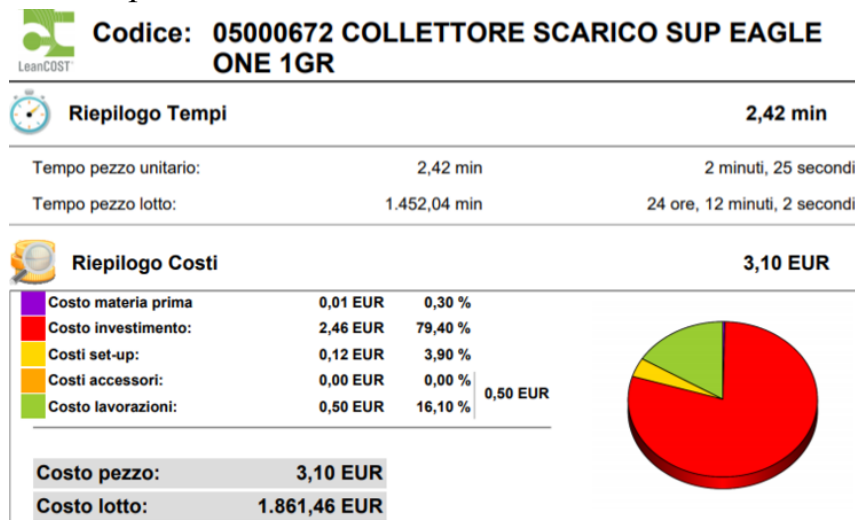


Figura 3.11: riassunto costi collettore superiore

# Capitolo 4: Riprogettazione del componente in ottica Additive Manufacturing

---

## 4.1 Introduzione

Il capitolo in questione vuole andare a descrivere il lavoro svolto dal sottoscritto per la riprogettazione del componente per migliorarne l'utilizzo ed ottimizzarlo per la stampa 3D.

Tutti i componenti non sono stati ripensati da zero appositamente per l'AM ma sono state eseguite delle migliorie e accorgimenti da file di componenti progettati per lo stampaggio ad iniezione.

## 4.2 Regole Modellazione per la Stampa 3d

In seguito, andremo ad elencare e spiegare le principali regole da utilizzare la progettazione in AM, alcune di queste possono essere generalizzate a tutte le tipologie di stampa additiva, mentre altre differiscono in relazione alla tecnologia utilizzata. Il progettista ancora prima di andare a modellare il disegno deve già avere una buona visione del tipo di processo di stampa che il pezzo potrà subire, basandosi sulle informazioni principali del progetto come:

- Materiale
- Tolleranze
- Finitura superficiale
- Dimensioni

Molte volte le linee guida da utilizzare per la progettazione del componente, vengono fornite dalle case produttrici di stampanti 3d, o da siti online che trattano questo tipo di tematiche e attraverso i vari forum, il progettista può attingere conoscenze e consigli condivise dai suoi colleghi da tutto il mondo.

### 4.2.1 Orientamento di Stampa

Con questo termine si determina il verso lungo l'asse ortogonale al piano dell'oggetto da stampare secondo il quale l'estrusore della macchina realizzerà le superfici del componente.

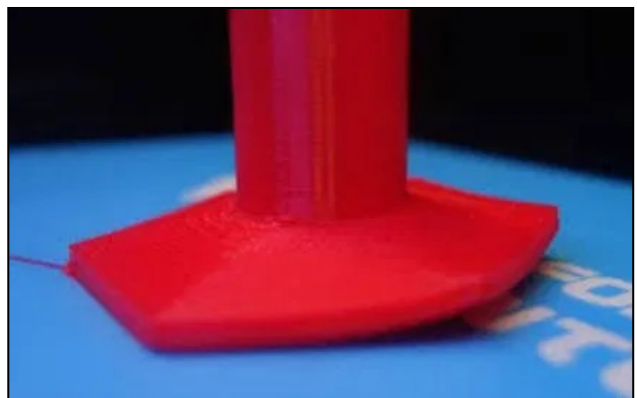
Il progettista deve essere bravo ad individuare la migliore superfici di stampa tra quelle del componente ed in relazione a queste andrà a modellare l'oggetto. la scelta dell'orientamento non deve essere univoca ma deve considerare diversi fattori come:

- *Diminuire i supporti necessari*: per farlo bisogna andare a minimizzare il più possibile le superfici che non sono auto supportate, per farle possiamo considerare un limite massimo di inclinazione delle superfici che in genere varia da 45/50° in base all'ugello utilizzato e all'altezza del layer. Infatti, minore è il diametro dell'ugello e minore è l'altezza del layer maggiori sono gli angoli raggiungibili perché la massa di ogni layer sarà minore, quindi meno pesante.



**Figura 4.1:** esempio di superfici auto supportate (Y) e di superfici non auto supportate (H,T)

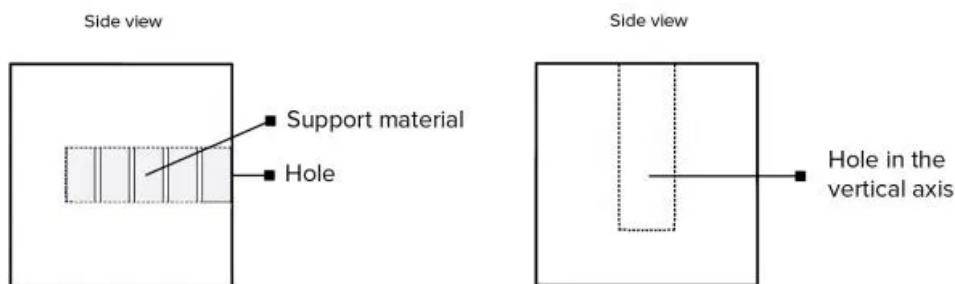
- *Appoggiare al piano della stampante il lato meno soggetto a warping*: significa evitare che le superfici a contatto con il piano della macchina siano quelle aventi spessori più sottili, in cui il ritiro in fase di raffreddamento del materiale depositato è più significativo, per



**Figura 4.2:** esempio di warping in un componente stampato in fdm

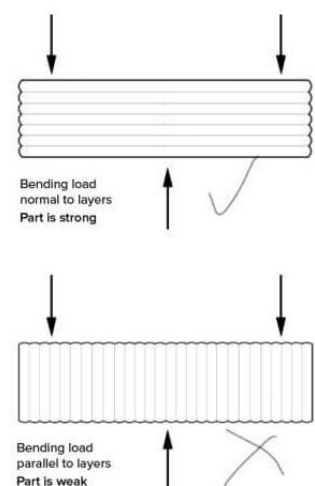
fare ciò il progettista può creare smussi a 45° o raggi sul piano appoggiato in modo da diminuire l'area di appoggio che subisce una restrizione e diminuire i vertici o spigoli vivi dove si accumulano queste tensioni di accorciamento.

- *Mantenere i dettagli sui lati verticali in modo da stamparli con la massima risoluzione (asse z) ed evitare l'effetto scalino dei layer:* accorgimento da utilizzare nel caso di fori, filettature ed elementi necessari per la funzione del componente.
- *Orientazione dei fori del modello:* fori stampati in 3D devono essere ottimizzati in funzione del grado di “imperfezione” della macchina che verrà utilizzata, in genere infatti vengono sovradimensionati (circa 0,25mm). quando possibile si cerca di rivolgere la faccia del foro verso la direzione di stampa in modo da evitare dei supporti interni che possono essere complicati da togliere in fase di post-processing.



**Figura 4.3:** esempio di stampaggio di foro in fdm

- *Orientamento per proprietà meccaniche:* in relazione a come il progettista sceglie la direzione di stampa del componente, esso otterrà delle proprietà anisotrope lungo una determinata direzione, per questo ne dovrà tenere conto in fase di progettazione in modo che il componente una volta stampato e montato sulla macchina sia in grado di supportare al meglio le sollecitazioni esterne. (es. figura 4.4)



**Figura 4.4**

## 4.2.2 Stress Termici durante lo stampaggio

Importantissimo al fine di un buon pezzo stampato è cercare di fare dei accorgimenti in modo da limitare, in quanto non è totalmente eliminabile, l'effetto di ritiro durante il raffreddamento del materiale stampato.

Questo fenomeno si presenta solamente nei processi di stampa in cui il materiale viene depositato nelle zone interessate ad alta temperatura (es: Fdm, Ded), qui le sollecitazioni termiche sono causate da dei velocissimi fenomeni di continuo raffreddamento e surriscaldamento delle zone stampate a causa del processo.

Le superfici del componente stampate, a contatto con l'aria e con la superficie della stampante, si raffreddano molto velocemente, nel frattempo l'estrusore deposita materiale su le restanti zone del componente quindi nel ritornare nella zona iniziale, nello strato sottostante troverà del materiale già raffreddato che in seguito raffredderà il nuovo depositato.

Gli accorgimenti che il progettista può utilizzare sono:

- Inserire dei supporti nelle zone interessate dal fenomeno per andare ad aumentare ad opporsi al ritiro.
- Evitare di fare combaciare col piano della stampante le superfici di grande estensione aventi degli spessori sottili.
- Minimizzare le area trasversali, perché in queste si accumula la maggior parte del calore derivante dal processo, quindi causeranno degli stress termici più elevati.
- Cercare per quanto possibile di diminuire lo sbalzo termico del materiale col piano della macchina, andato e riscaldarlo. Si può pensare anche di riscaldare il volume della macchina per limitare il gap termico tra gli strati di materiale. In genere si utilizza una temperatura leggermente inferiore ai 100°C per il piatto di stampa.
- Il progettista durante la modellazione del modello deve avere ben chiaro il tipo di materiale che verrà utilizzato nel processo e le caratteristiche della macchina scelta come: tolleranze, volume, velocità ecc...

Non considerare il materiale da utilizzare prima di cominciare la modellazione può essere un grave errore.

Il motivo è presto detto, non tutti i materiali hanno lo stesso grado di ritiro.

Nella tabella sono espresse le minime/massime percentuali di restringimento di alcuni materiali utilizzati nella stampa, cioè la percentuale di deformazione termica che possiamo aspettarci.

Ad esempio per una stampa 3D di un cubo 100x100x100 mm  
 Stampandolo in Pekk possiamo aspettarci una dimensione finale di  
 100x100x100 ± 0.004-0.005 mm.

Polymer	Minimum Shrinkage, %	Maximum Shrinkage, %
PEKK (Polyetherketoneketone– Low crystallinity)	0.004	0.005
PAI (Polyamide-Imide) low friction	0.1	0.5
PS (Polystyrene) crystal	0.1	0.7
PVC (Polyvinyl Chloride) rigid	0.1	0.6
PAN (Polyacrylonitrile)	0.2	0.5
PI (Polyimide)	0.2	1.2
PLA (Polylactide-injection molding)	0.3	0.5
ABS (Acrylonitrile-Butadiene Styrene)	0.7	1.6
PC (Polycarbonate)	0.5	0.7
ABS (Acrylonitrile-Butadiene Styrene/Polycarbonate)	0.5	0.7
ABS/PC (Acrylonitrile-Butadiene Styrene/Polycarbonate) 20% glass fiber	0.2	0.3
HDPE (High Density Polyethylene)	1.5	4
Polypropylene copolymer	2	3
Polypropylene homopolymer	1	3
Polypropylene 10-40% talc	0.9	1.4
Polypropylene 30-40% glass fiber	0.1	1
Polyamide 6	0.5	1.5
Polyamide 6-6	0.7	3

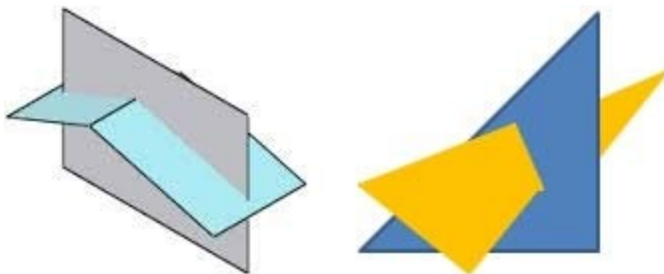
*Figura 4.5: tabella delle percentuali di minimo/massimo restringimento*

### 4.2.3 File ad alta risoluzione e Bad Edge

Al fine di una buona riuscita del prodotto, si cerca sempre di utilizzare il file che presenta una risoluzione maggiore in modo che approssimi la geometria, commettendo il minor errore possibile in quanto possono esserci delle deformazioni del modello causate dalla semplificazione errata della mesh.

Tra gli errori più comuni da evitare abbiamo:

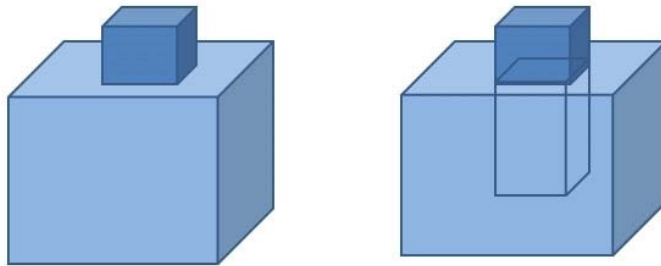
1. *Superfici intersecanti*: sono delle superfici che si compenetrano a vicenda senza generare un bordo, costituiscono uno dei problemi più gravi, causando quasi sempre errori di interpretazione nei software di slicing.



*Figura 4.6: esempio di superfici intersecanti tra loro*



2. Superfici ridondanti: in alcune superfici di solidi può capitare che esistano, al suo interno, alcuni elementi duplicati o ridondanti come: linee, vertici o facce in più. Queste durante la conversione nel software slicing possono compromettere il lavoro del programma.



*Figura 4.7: poligono avente delle superfici al suo interno*

#### 4.2.4 Alcune regole generali per la progettazione in 3d

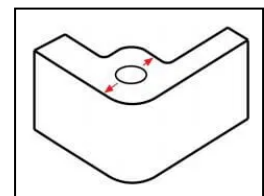
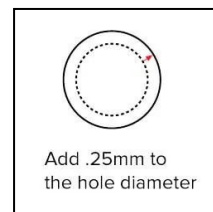
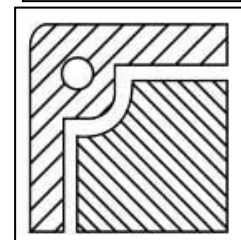
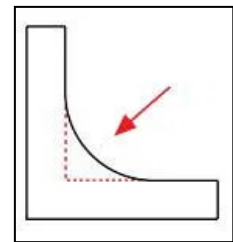
-È assolutamente opportuno: conoscere il grado di precisione della nostra stampante e conoscere i limiti della tecnologia.

-Raggiare quando possibile gli spigoli vivi per irrobustire la struttura ed eliminare zone di concentrazione delle tensioni.

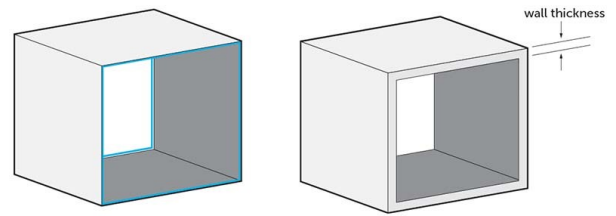
-Mantenere una tolleranza minima tra per gli incastri tra 0.3 – 0.5 mm in base alla precisione della propria macchina.

-Aumentare il diametro dei fori di 0.25 mm in base alla precisione della propria macchina.

-Aumentare il più possibile il materiale attorno a fori che saranno filettati per migliorare la tenuta e la longevità del pezzo.

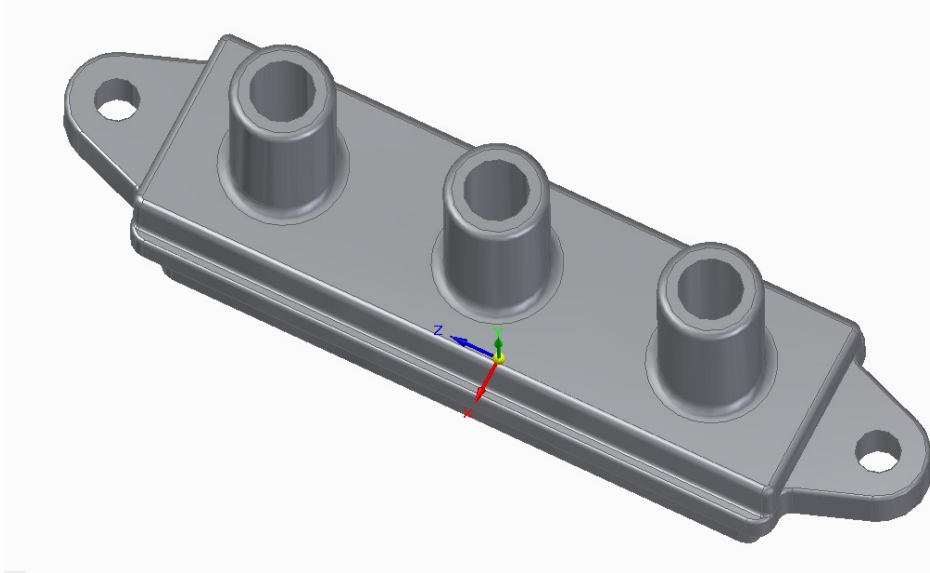


-Oggetti cavi: Gli oggetti cavi devono essere progettati con pareti di un certo spessore. Non devono esistere pareti formate solamente da una superficie. Lo spessore minimo dovrebbe tenere conto del diametro dell'estrusore che si intende utilizzare nella stampa. In genere lo spessore viene scelto come multiplo del diametro dell'estrusore.

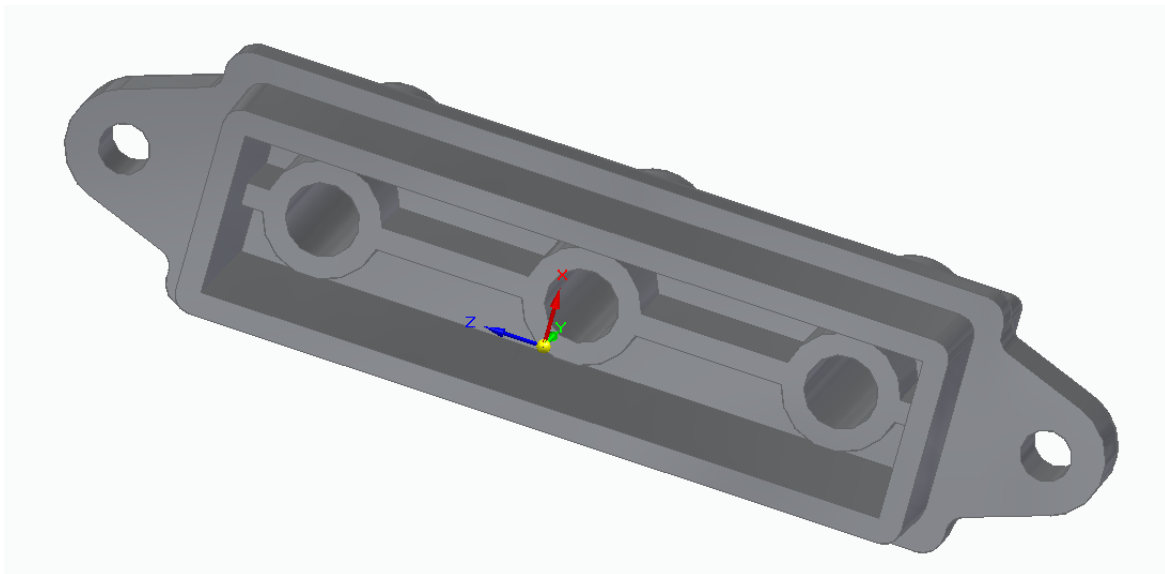


### 4.3 Riprogettazione del collettore di Scarico Superiore

In questo paragrafo andremo a descrivere il lavoro che abbiamo eseguito sul componente superiore del collettore di scarico utilizzando gli accorgimenti che abbiamo descritto precedentemente sapendo che esso verrà realizzato in plastica Abs o in Polipropilene con tecniche in Fdm o Sls.



*Figura 4.8-4.9: viste in 3D del collettore di scarico superiore prima della riprogettazione del componente*

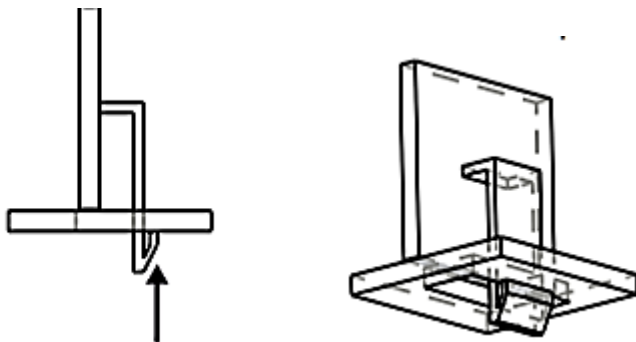


### 4.3.1 Fasi della Riprogettazione

Il punto di partenza del lavoro eseguito è stata l'eliminazione della vite autofilettante che serviva a garantire il collegamento tra le due parti, in modo da eliminare un elemento per il montaggio del pezzo e se anche molto irrisorio abbiamo sostituito un componente che l'azienda avrebbe dovuto acquistare da terzi per la produzione della macchina.

In questo caso non è stato possibile andare ad utilizzare uno dei grandi vantaggi della tecnologia additiva, ovvero il raggruppamento delle parti infatti molte volte l'intero assieme può essere stampato per intero senza successivamente montare le singole parti che lo compongono. Il componente di scarico periodicamente doveva essere aperto, pulito e revisionato da un tecnico per la manutenzione in quanto dentro di esso scorrono elementi scarto del processo che a lungo andare potrebbero comprometterne l'utilizzo.

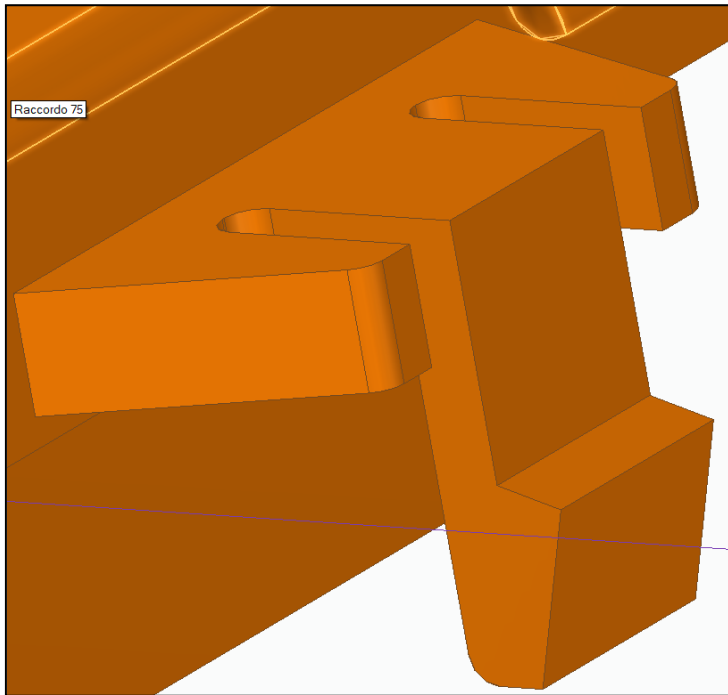
Serviva quindi un tipo di collegamento facile e intuitivo per l'operatore che avrebbe montata o revisionato il componente e più veloce rispetto la tradizionale vite. Come proposta per il collegamento delle due parti abbiamo scelto un tipo di collegamento a clip di incastro detto a "microleva gancio" ricavato da un catalogo online che abbiamo rimodellato e ricreato nell'estremità laterali del collettore dove precedentemente erano presenti i fori per l'inserimento della vite autofilettante.



*Figura 4.10: accoppiamento a microleva gancio preso del catalogo online del Politecnico di Milano*

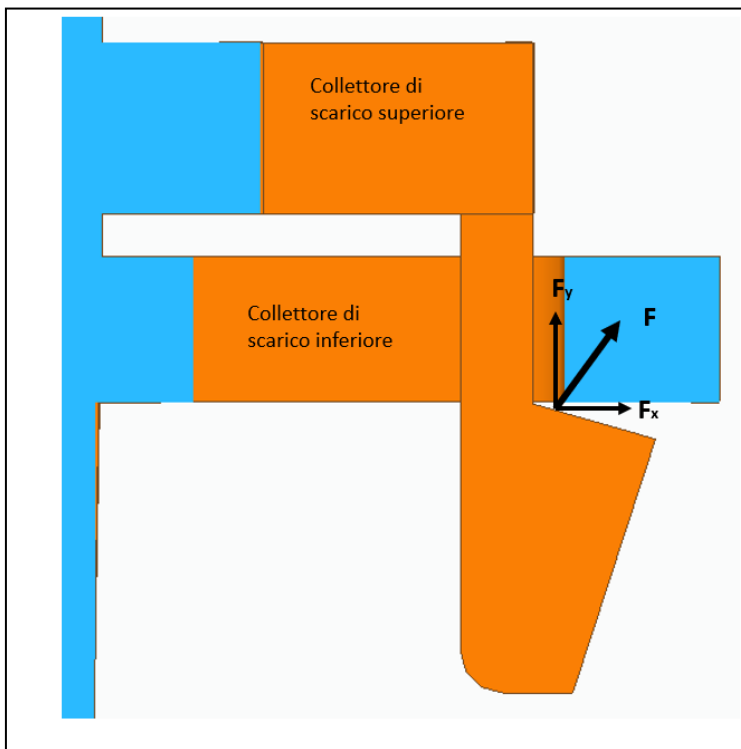
Rispetto al disegno di partenza, il nasello del sistema a microleva è stato rimodellato, rendendolo più consono al nostro sistema di fissaggio, infatti abbiamo eliminato il profilo interno che durante lo stampaggio poteva creare dei inutili supporti e abbiamo inclinato la superficie di circa  $5/8^\circ$  di contatto tra le due parti in modo da facilitarne il montaggio e per fare in modo che il componente superiore durante il fissaggio eserciti una forza normale alla superficie e quindi avente componente ortogonale e parallela al corpo migliorandone il fissaggio.

*(Figura 4.12)*



Le asole presenti sulla superficie superiore del collettore, sono state ricavate per far sì che durante il montaggio, venga favorita la flessione del nasello, per poi permettere di ritornare alla posizione originale.

**Figura 4.11:** sistema di clip a microleva gancio disegnato sul componente 3d

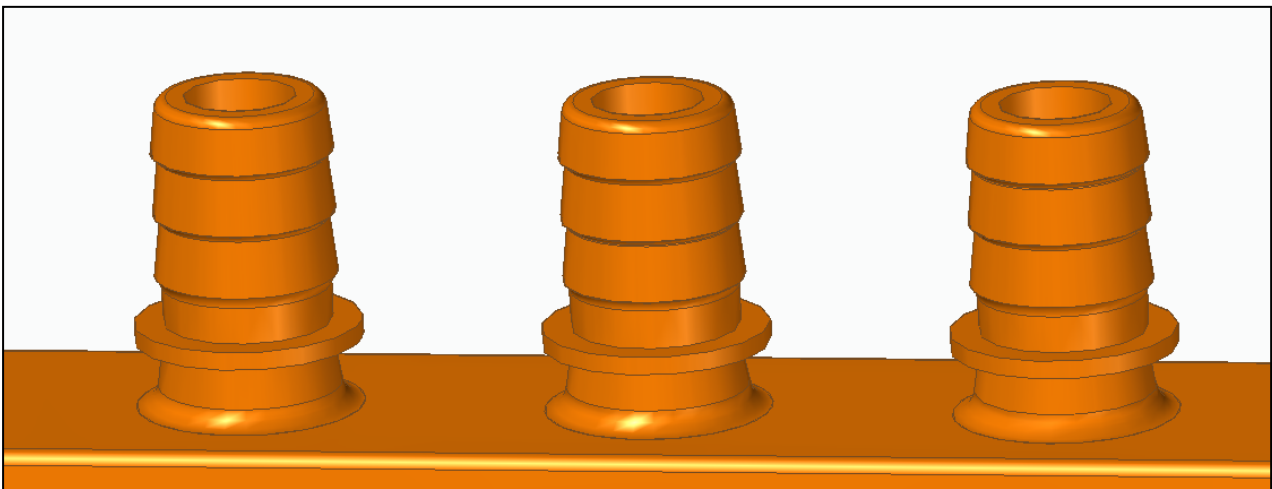


**Figura 4.12:** sistema di forze che permettono il funzionamento della clip

Successivamente siamo andati a modificare i fori di attacco dei tubi di scarico della macchina presenti sulla faccia superiore del collettore, questi fori servono principalmente per unire il collettore al sistema di scarico tramite dei appositi tubi in gomma.

Siamo andati quindi a rimodellare la superficie dei tubi tramite dei profili ondulati che ne facilitano l'inserimento e trattengono il tubo agganciato al foro in modo da evitare l'uso di fascette o altra componentistica di fissaggio che comporta come prima un aumento di costo e tempo per il montaggio.

Sulla parte finale del foro abbiamo anche aggiunto un anello attorno al foro in modo da mandare da farlo andare in battuta con lo spessore del tubo.



*Figura 4.13: fori di attacco del tubo rimodellati*

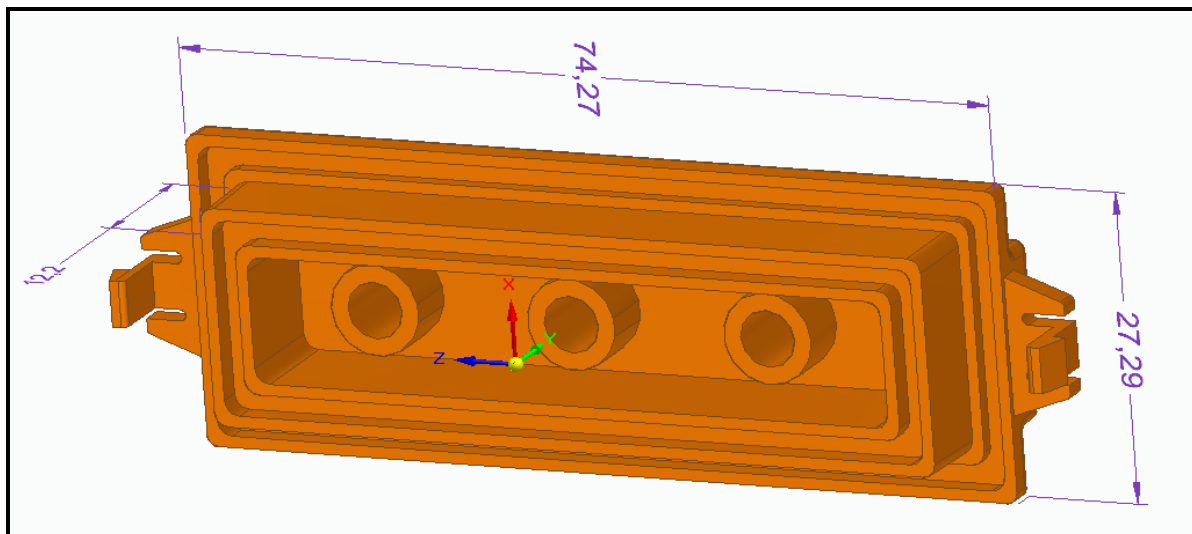
Passiamo alla parte interna del collettore, dove abbiamo cercato di mantenere invariato il volume di lavoro del componente in modo da non andare a compromettere il deflusso dei liquidi che lo percorrono durante il funzionamento e facendo sì che il collettore possa andare a lavorare gli stessi volumi di acqua e vapore originari.

Molto semplicemente abbiamo eliminato degli elementi che collegavano i fori interni in modo da risparmiare: materiale, costi e abbiamo limitato l'uso dei supporti per la loro creazione. Questi particolari erano derivati dalla progettazione del componente per lo stampaggio ad iniezione e quindi completamente senza funzionalità per lo stampaggio in AM.

Confrontandoci con l'esperienza dei progettisti della Nuova Simonelli, essi ci hanno dato dei chiari aiuti sul comportamento del componente montato sulla macchina, infatti durante il funzionamento della macchina poteva capitare che in entrata del collettore entri un vapore acqueo a una sovrappressione di 3-4 bar che faceva in modo che anche se il componente era ben serrato, esso trasudava del liquido in prossimità della superficie di fissaggio delle due parti. Questa non tenuta del componente faceva in modo che il liquido di scarico rimaneva intrappolato all'interno della macchina e finiva di rovinare i componenti interni.

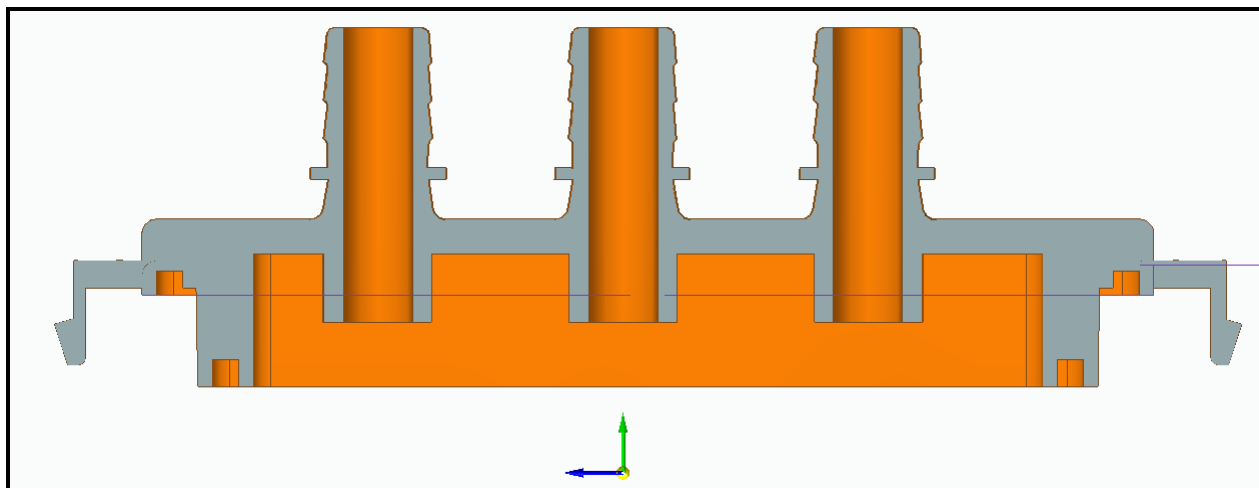
Per ovviare a questo problema abbiamo scelto di andare a creare un tipo di sistema di tenuta detto a labirinto. Questo sistema si basa principalmente nell'andare a creare volutamente delle perdite di carico distribuiti in modo da andare a diminuire la pressione del liquido, facendo in modo che esso non vada all'esterno del collettore.

Per creare questo tipo di tenuta, abbiamo inserito dei appositi profili lungo il perimetro del collettore superiore e inferiore, successivamente abbiamo fatto in modo che durante l'accoppiamento il liquido sia costretto a percorrere un percorso più lungo prima di poter uscire dal componente, in modo da aumentare le perdite di carico distribuite, diminuendo la pressione del fluido.



*Figura 4.14: sistema di tenuta a labirinto collettore superiore*

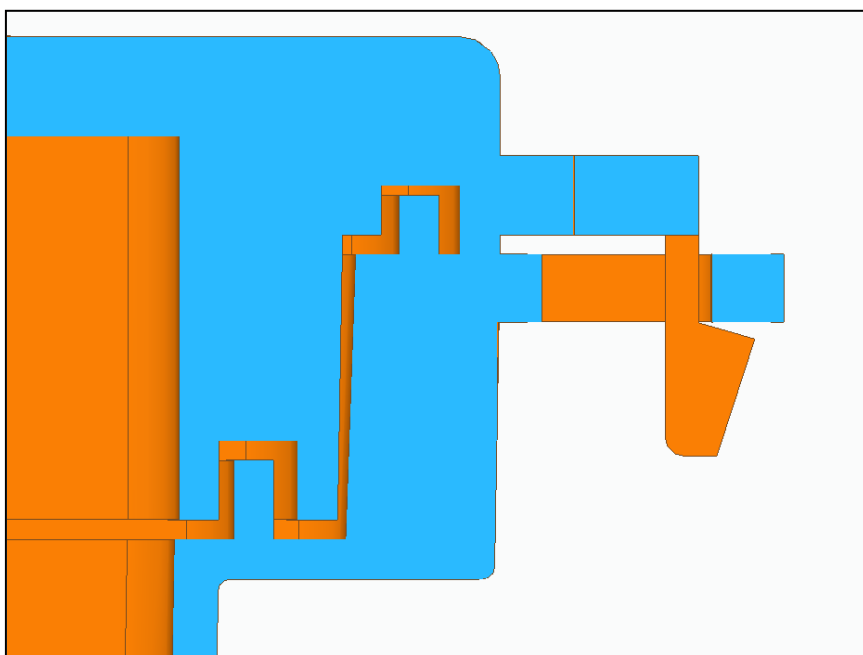




**Figura 4.15:** sezione dei profili del sistema di tenuta

Per creare i profili del sistema di tenuta, abbiamo dovuto considerare le tolleranze richieste dalla stampante fdm e quelle relative all'accoppiamento delle due parti, per questo abbiamo cercato di non disegnare dei profili con spessore più bassi di 0,3mm e di garantire che nell'accoppiare i due componenti sia garantito questa misura minima per i canali di passaggio del liquido.

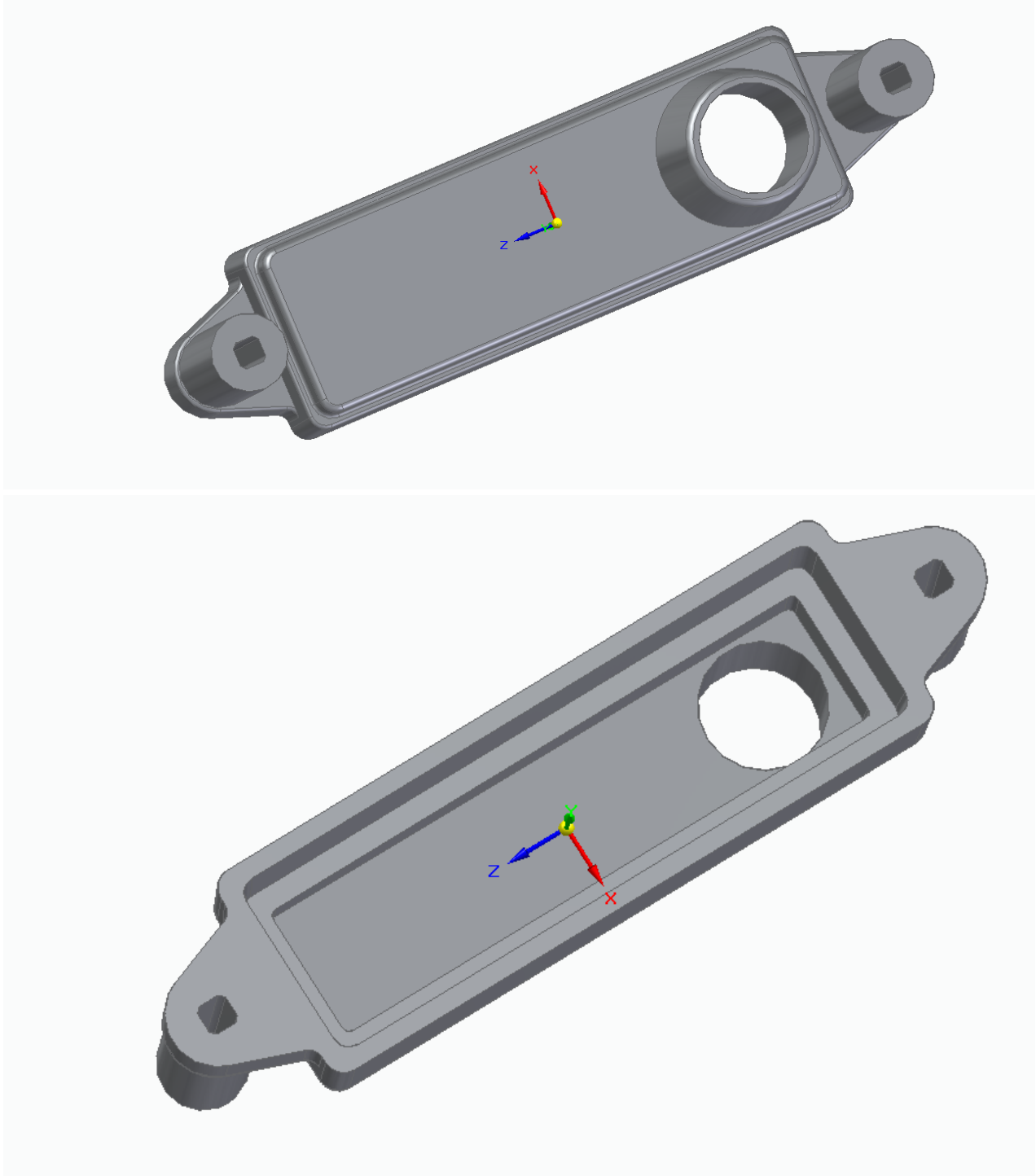
Volendo preservare il volume originale interno del componente, a per la creazione del sistema di tenuta abbiamo dovuto aumentare i suoi ingombri, lasciando invariata la sua altezza, passando da 64x18mm ad circa 74,3x27,3mm  $\pm 0.03$ .



**Figura 4.16:** accoppiamento tra le due parti del collettore con il sistema di tenuta a labirinto.

#### 4.4 Riprogettazione Collettore di Scarico Inferiore

Come nel paragrafo precedente prima andremo a visualizzare il componente come ci è stato proposto dall'azienda e successivamente spiegheremo le modifiche che gli abbiamo apportato per migliorarne l'utilizzo e per far sì che fosse ottimizzato per lo stampaggio 3D nello stesso materiale e con lo stesso processo del collettore superiore.

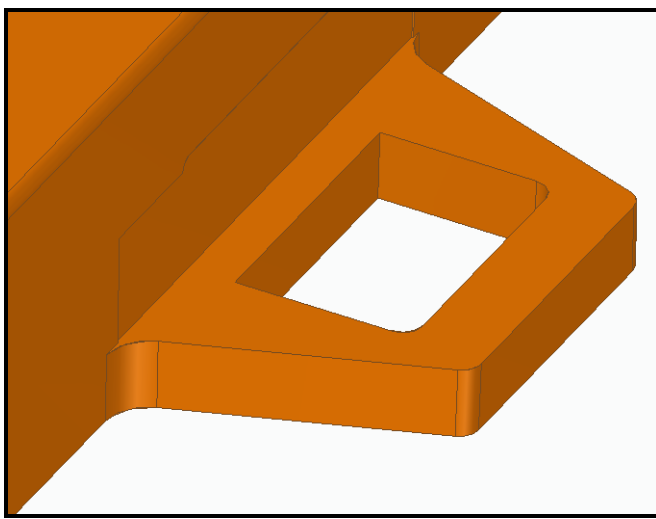


*Figura 4.17-4.18: viste in 3D del collettore di scarico inferiore prima della riprogettazione del componente*

#### 4.4.1 Fasi della Riprogettazione

Per prima cosa, come nel rispettivo collettore superiore, siamo andati ad eliminare i tutti i profili che in origine erano necessari per il collegamento mediante l'uso della vite autofilettante, al loro posto abbiamo inserito un profilo detto a “microleva anulare” che permette di agganciare il profilo del nasello del collettore superiore a quello inferiore (*vedi figura 4.12*).

L'ulteriore vantaggio dell'utilizzo di questo sistema nel componente inferiore è molto più evidente rispetto il suo simile, infatti abbiamo eliminato, quindi risparmiato, un enorme quantità di materiale che costituiva i fori per l'ingresso della vite che precedentemente avevano un'altezza superiore al componente stesso in modo da permette il fissaggio sul telaio della macchina.

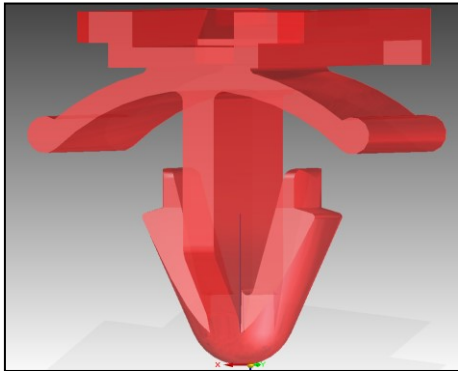


*Figura 4.19: sistema a microleva anulare per il fissaggio delle parti*



*Figura 4.20: confronto tra il tra le due estremità del collettore prima e dopo la riprogettazione*

Nasceva però il problema di come andare a collegare l'intero collettore assemblato al resto della macchina che precedentemente era collegato tramite la vite. Abbiamo deciso anche qui di andare ad utilizzare un tipo di collegamento con connettore clip ad espansione ricavato anch'esso da un catalogo online di un nota azienda che ne commercia. *(vedi bibliografia)*



**Figura 4.21:** disegno 3D della clip di fissaggio utilizzata, ricavato dal catalogo online della Hellermann Tyton S.r.l

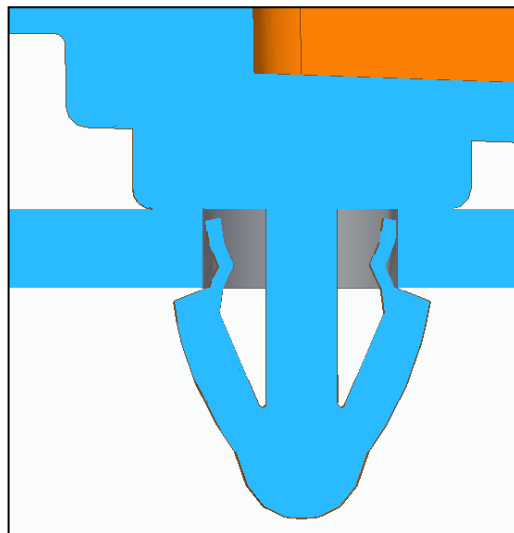
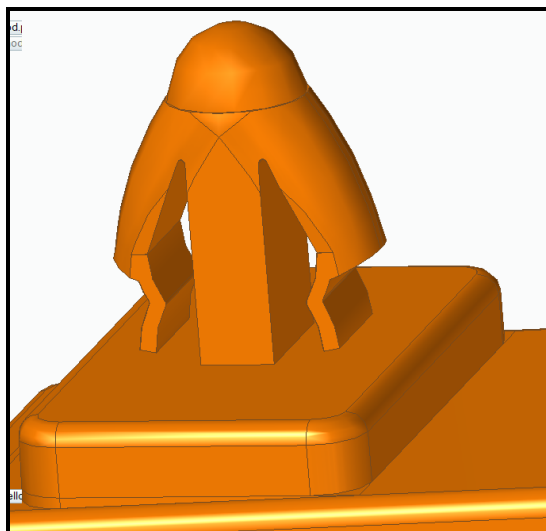
Questo tipo di clip permette di andare a bloccare lo spostamento trasversale del componente tramite l'inserimento di essa, all'interno di un apposito foro, le alette sui lati della clip mediante l'applicazione di una forza, si flettono avvicinandosi all'asse della clip. Una volta inserita e fatta scorrere le parete laterali della clip vanno ad esercitare una pressione sullo spessore del foro, bloccando l'oggetto.

Rispetto alla clip del catalogo online, per i nostri scopi bisognava andare ad inserire dei componenti in modo da adattarla al meglio per il montaggio.

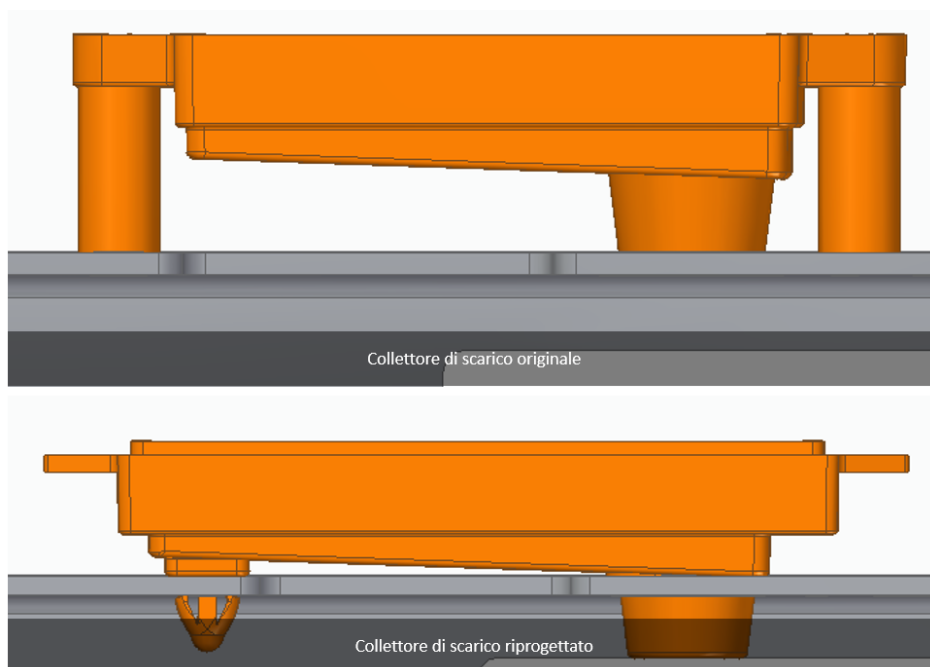
Innanzitutto per poter utilizzare la clip, serviva un foro nel telaio dove andare ad inserirla, così abbiamo deciso di utilizzare il foro precedentemente ricavato nel telaio per il serraggio con la vite in modo da non andare ad eseguire delle lavorazioni su di esso. Per fare ciò bisognava andare ad aumentare gli ingombri del componente in modo che la faccia esterna del collettore inferiore, dove si sarebbe costruita la clip ne avrebbe permesso l'inserimento.

Essendo la superficie esterna del collettore inferiore inclinata per permettere il defluire naturale dei liquidi che la attraversano verso il foro di scarico, su questa superficie abbiamo dovuto andare a creare una base piana per la creazione della clip e per fare appoggiare il collettore una volta montato.

Abbiamo successivamente modificare la geometria interna delle alette della clip, in modo da garantire una maggiore presa sul foro e per facilitare l'inserimento della clip stessa.



*Figura 4.22-4.23: clip utilizzata per il fissaggio del collettore al telaio*

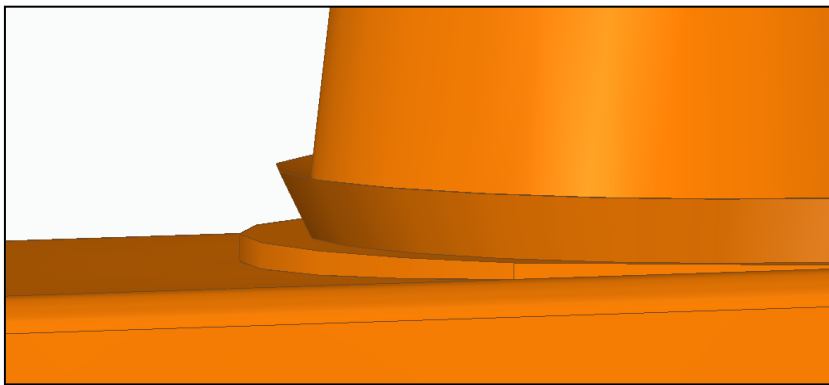


*Figura 4.24: confronto tra i due sistemi di collegamento del collettore inferiore sul telaio, dalla foto si evidenzia la il perché della maggiorazione della lunghezza del collettore per creare la clip*

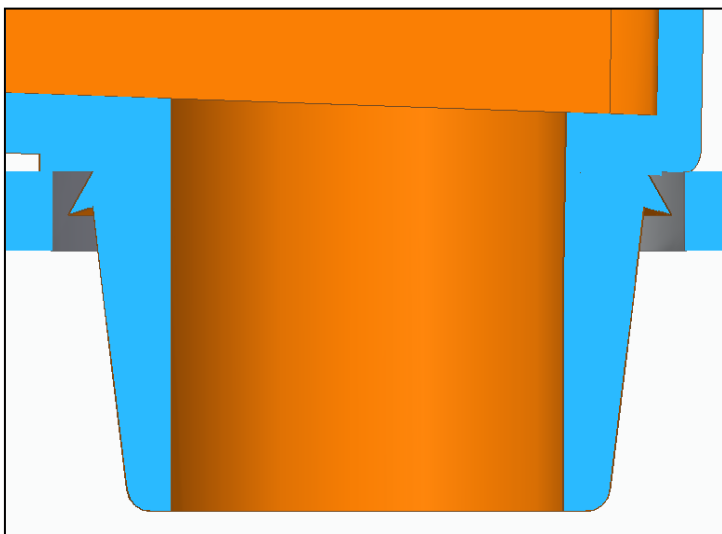
Anche per il collettore inferiore, il confronto con i professionisti della Nuova Simonelli, ha messo alla luce delle problematiche durante il funzionamento del componente, infatti durante lo scarico dell'acqua dal foro sottostante, alcune gocce di liquido non venivano correttamente espulse e accumulandosi sul labbro del foro, risalivano lungo il profilo laterale del foro di scarico e rischiavano di entrare all'interno della macchina.

Per evitare questo problema potevamo inserire un cono di scarico alla fine del foro, oppure più semplicemente creare un rompigoocia ai piedi del foro di scarico formato da un profilo inclinato che faceva in modo che le gocce d'acqua risalenti il profilo laterale, in prossimità del rompigoocia si accumulavano nel profilo e per gravità cadevano nello scarico, preservando l'integrità della macchina.

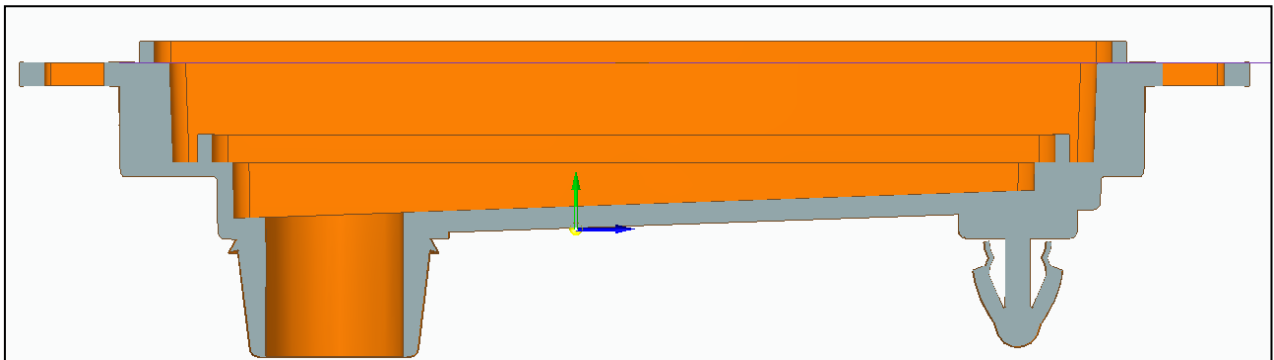
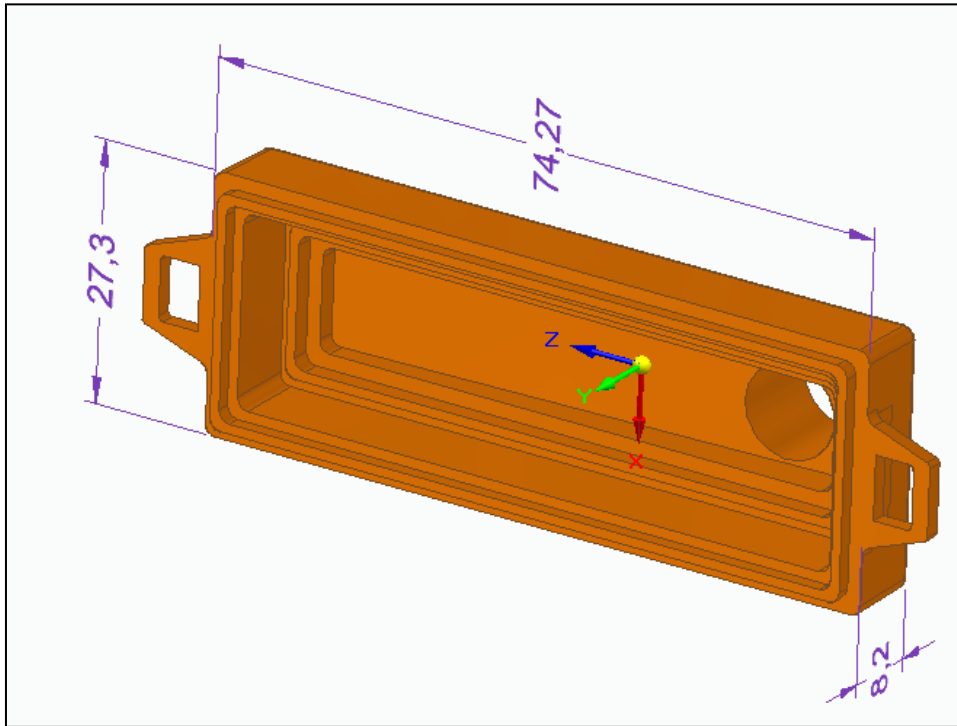
sempre sulla base del foro di scarico, abbiamo creato un profilo piano attorno ad esso in modo da fare appoggiare il collettore una volta montato su una superficie piana anziché inclinata.



*Figura 4.25-4.26: profilo inclinato utilizzato come rompigoocia e profilo piano utilizzato per l'appoggio del collettore al telaio*

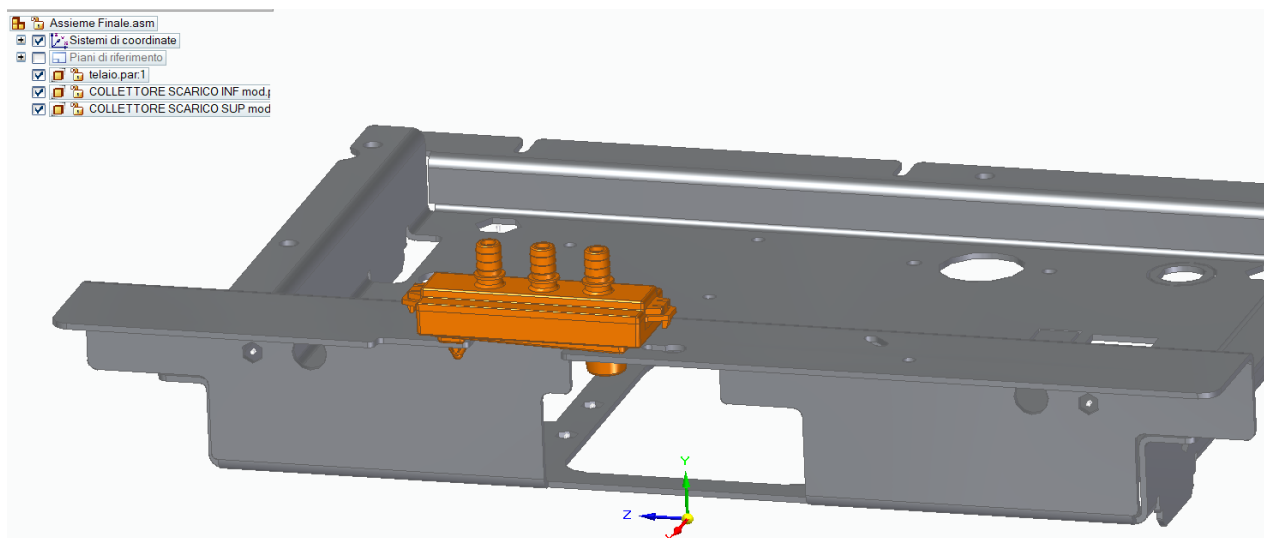


Riguardo l'interno del collettore inferiore, anche qui abbiamo utilizzato gli stessi accorgimenti del collettore superiore, preservando il volume interno e andando ad aumentare gli ingombri per la creazione del sistema di tenuta a labirinto come mostrati in *figura 4.27-4.28*, avente degli appositi profili che consentano il collegamento delle due parti.

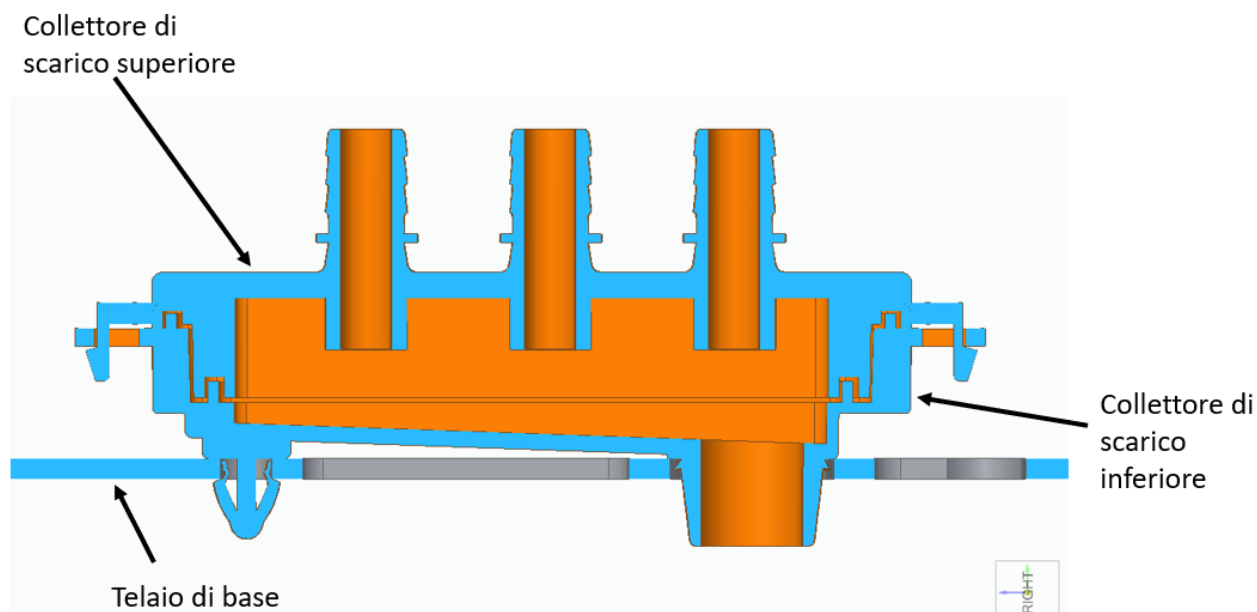




## 4.5 Risultato Finale



*Figura 4.29: collettore di scarico montato sul telaio della macchina del caffè*



*Figura 4.30: vista in sezione del componente sul telaio della macchina*

# Capitolo 5: Simulazioni di Stampa & Calcolo dei Costi

---

## 5.1 Simulazione del processo di stampa

Una volta ottenuti i file ultimati della riprogettazione del componente è stato utile tramite il software di slicing Cura, andare a simulare il processo di stampa in fdm del componente (il software più simulare solo questo processo) andando ad analizzare i principali parametri da considerare durante lo stampaggio.

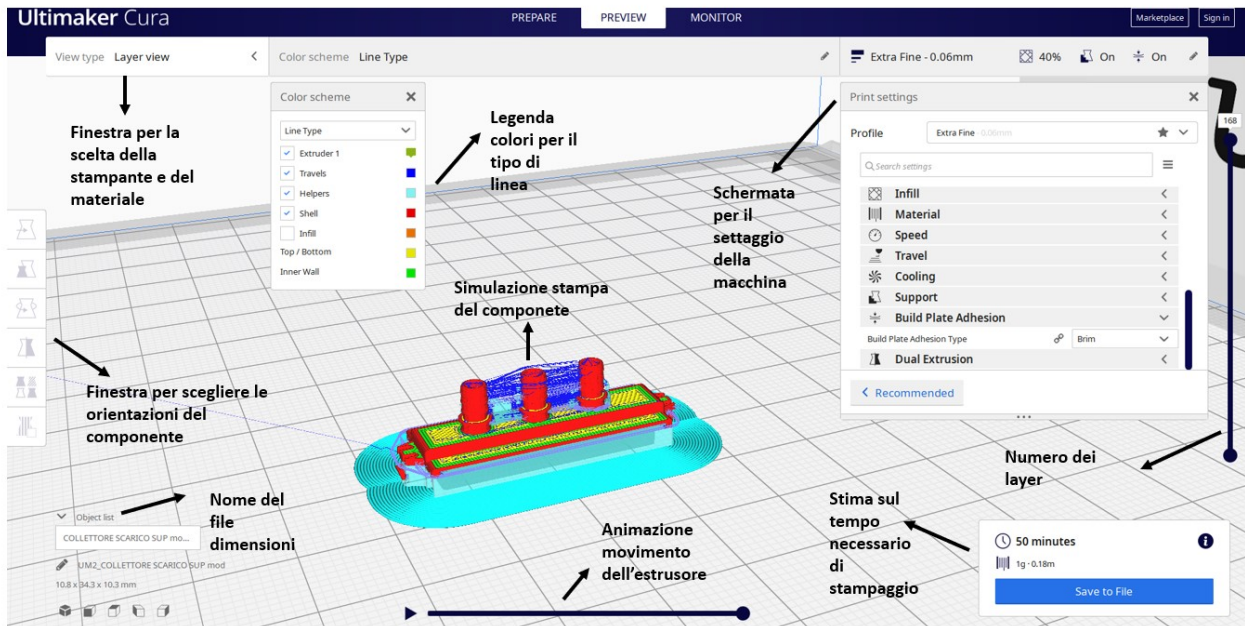
Il software una volta introdotto il file in formato stl del componente, permette di andare a scalare l'oggetto, ruotarlo e spostarlo a piacimento all'interno del volume della macchina in modo da poter simulare più scenari di stampa possibili, così poi da poter individuare il più consono per il processo.

Una volta ottenuta la direzione desiderata, si inizia a configurare i parametri di stampa necessari, quali:

- tipologia della macchina da utilizzare tra un enorme ventaglio di modelli per lo più costruiti dall'azienda Ultimaker
- materiale con cui vogliamo stampare il componente e l'altezza di ogni singolo layer
- scelta dell'angolo massimo entro il quale creare i supporti e che di che tipo di materiale
- è possibile scegliere la velocità di movimento dell' estrusore e la finitura superficiale da ottenere alla fine del processo
- temperatura della macchina e del materiale depositato
- caratteristiche costruttive dell'estrusore

Una volta configurato al meglio il processo in relazione alle caratteristiche più prossime a quelle con cui la macchina andrà lavorare, procediamo con lo slicing del modello. Il software simula il passaggio dell'estrusore che permette il realizzazione del pezzo in modo da dare un'informazione del numero di layer necessari per il completamento e una stima del tempo necessario.

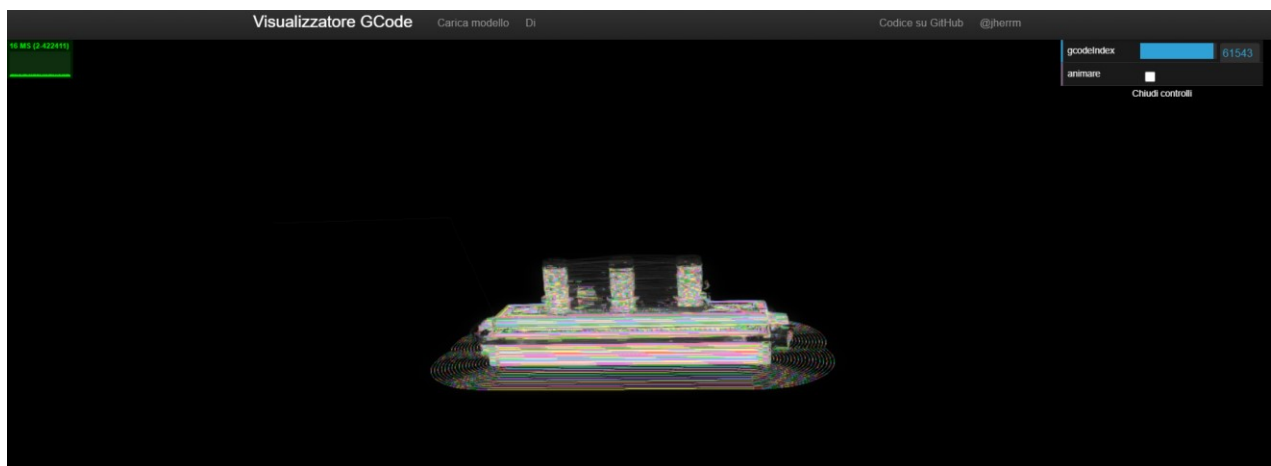
Tramite una legenda di colori possiamo identificare se il materiale depositato in quella zona dall'estrusore è per la creazione di un supporto, per creare il componente, oppure sono dei filamenti più sottili che l'estrusore crea involontariamente durante il passaggio da due zone lontane del pezzo (travels). Infine il programma in automatico scrive file di tipo Gcode per la creazione del modello che l'operatore può salvare ed inviare alla propria stampante.



**Figura 5.1:** esempio di simulazione di stampaggio con software Cura, stampante Ultimaker 2+ in abs sul collettore di scarico superiore

Per una visualizzazione più rapida del processo di stampaggio una volta ottenuto il file Gcode per lo stampaggio, senza riandare a settare la macchina e tutti i vari parametri nel software Cura, online sono presenti dei siti dedicati come Gcode Viewer che permettono di caricare il proprio file Gcode ed in automatico permettono di visualizzare il processo in modo molto veloce.

In alternativa si possono scaricare dei appositi programmi come Simplify3d che svolgono le stesse operazioni dei siti online.



**Figura 5.2:** processo di stampa con Gcode Viewer

## 5.2 Preventivazione dei costi tramite siti in AM

Una volta quindi aver ottenuto il file finali in formato stl/step ci serve di capire per l'obiettivo finale della tesi, la convenienza economica di questa tecnologia. Perciò dobbiamo quindi andare a ricavare come nel *capitolo 3* i costi derivanti dallo stampaggio 3D.

Per preventivare questi costi si possono utilizzare due metodi:

- 1- Andare ad usufruire dei numerosi programmi online che sono messi a disposizione dalle aziende del settore additive. Questi programmi tramite il caricamento del modello Cad nei formati desiderati, permettono in pochissimo tempo darci una stima del costo del componente in relazione al tipo di tecnologia di stampa selezionata.  
Generalmente questi preventivi online non sono molto accurati, in quanto non considerano molti fattori del processo e del marketing che si avranno del caso reale. Perlopiù talvolta possono essere discordanti tra loro in quanto ogni sito online è riferito ad una determinata azienda di stampaggio.  
Tra i principali siti online ricordiamo: *SP3D, 3DHUBS, Protolabs, Craft Cloud, Prototek, Materialise*
- 2- Utilizzare degli appositi modello di calcolo, sottoforma di formule matematiche, che l'operatore in relazione alle caratteristiche del processo che vuole analizzare gli permettono di calcolare molto dettagliatamente il costo del componente.

*(questi modelli di costo sono più dettagliatamente discussi nella tesi del mio collega Mazzanti Luca)*

Per l'utilizzo dei siti web nella preventivazione dei costi del componente stampato, abbiamo considerato l'utilizzo di diversi processi di stampa e diversificando le tipologie di polimeri utilizzati abbiamo avuto modo di analizzare diversi scenari si processo, in modo da avere una visione più ampia sui costi del componente e la sua correlazione al tipo di processo e materiale utilizzato

In seguito verrà riportata una tabella dei costi, considerano per esempio un lotto da 1000 pezzi sia per il collettore di scarico superiore ed inferiore dopo la riprogettazione.

19									
20	collettore inferiore	riprogettato	lotto:	1000 pezzi					
21									
22	materiale	PA 12	PA 12	ABS	PC-like	PP	PA 11		
23	processo	SLS	FDM	FDM	SLA	SLS	SLS		
24									
25	SD3D		5.879 €		2.468 €				
26									
27	3DHUBS		4.180 €	3.230 €	1.850 €				
28									
29	PROTOLABS		8.137 €			31.577 €			
30									
31	CraftCloud		2.044 €		990,00 €		17.835,00 €		
32									
33	prototek		2.570,00 €						
34									
35	xometry		9.580,00 €	20.430,00 €	7.350,00 €	14.470,00 €		13.130,00 €	
36									
37	materialise		6.070,00 €		66.430,00 €				

**Figura 5.3:** preventivi costi del collettore superiore dopo la riprogettazione

18									
19	collettore superiore	riprogettato	lotto:	1000 pezzi					
20	materiale	PA 12	PA 12	ABS	PC-like	PP	PA 11	PA 12	
21	processo	SLS	FDM	FDM	SLA	SLS	SLS	MJF	
22									
23	SD3D	8.156 €		4.533 €					35.337 €
24									
25	3DHUBS	5.340 €	3.930 €	2.190 €					5.640 €
26									
27	PROTOLABS	10.119 €			33.512 €	10.404 €	11.223 €		7.687 €
28									
29	CraftCloud	3.219 €		1.401 €		17.874 €			
30									
31	prototek								3.710 €
32									
33	xometry	10.770 €	23.440 €	8.435 €	18.950 €		14.634 €		5.880 €
34									
35	materialise	6.950 €					8.380 €		

**Figura 5.4:** preventivi costi del collettore inferiore dopo la riprogettazione

Dalle tabelle riportate in alto si può meglio visualizzare come ci sia una discordanza molto profonda tra i preventivi dei costi tra i diversi siti a parità di tecnologia e materiale utilizzato per lo stesso componente.

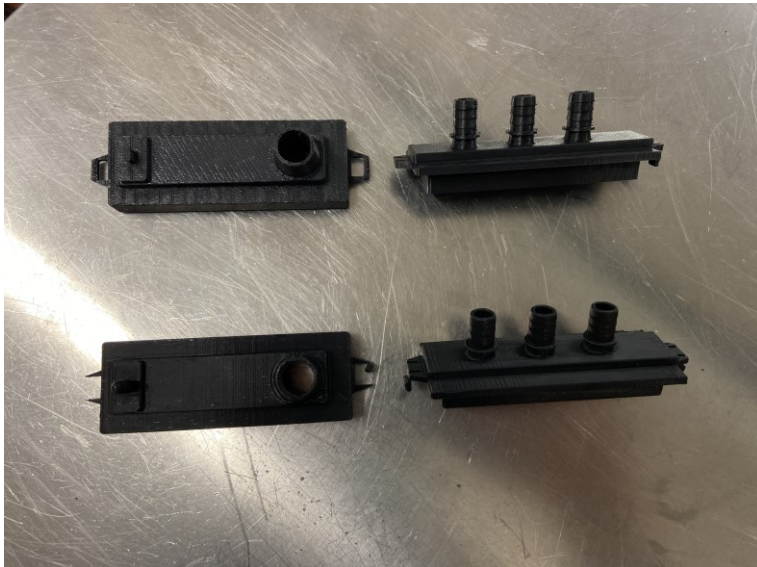
Risulta sempre verificato nelle due tabelle un costo più elevato, a parità di caratteristiche e sito considerato, rispetto al componente inferiore per via di una geometria leggermente più complessa che necessita di un numero maggiore di supporti.

### 5.3 Stampa dei Componenti

Arriviamo finalmente alle fasi finali della trattazione di questa tesi. I file in formato step dei componenti del collettore di scarico sono stati inviati direttamente all'azienda Nuova Simonelli che personalmente ha effettuato le prime bozze di stampa con le loro apparecchiature.

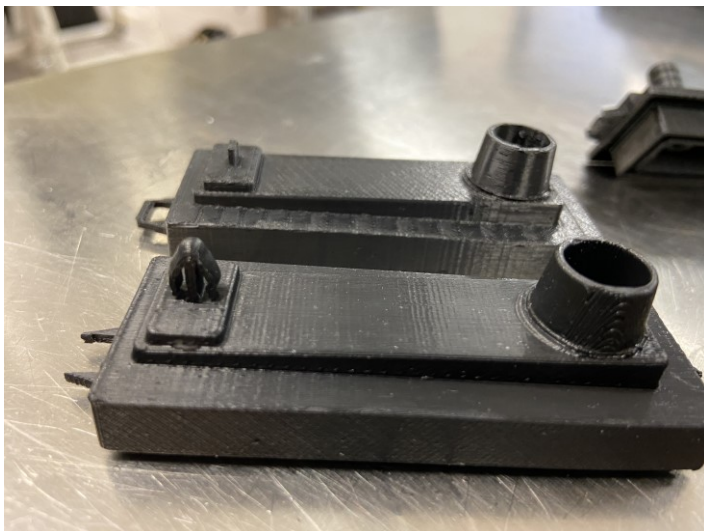
La stampa dei componenti è avvenuta con la stampante 3D Stratasys F370 che utilizza le tecniche Fdm e nel caso in questione ha stampato i componenti utilizzando un layer da 0,14 mm di materiale.

Per ogni componente sono state eseguite ben quattro prove di stampaggio, variando di volta in volta le orientazioni di stampa per cercare quella configurazione che permetteva il corretto stampaggio delle parti.



*Figura 5.5-5.8: componenti superiori e inferiori del collettore di scarico, stampati in azienda*

*Figura 5.5*



*Figura 5.6*





**Figura 5.7-5.8**

Come possiamo ben visualizzare dalle immagini precedenti lo stampaggio dei componenti ha messo in luce degli errori sul collettore di scarico inferiore, infatti, nel sistema a microleva anulare usato per il fissaggio delle due parti, in prossimità del raccordo interno l'estrusore esegue solamente due passate di materiale andando a limitare la sezione resistente e facendo in modo che si rompa con estrema facilità durante il montaggio dei componenti.



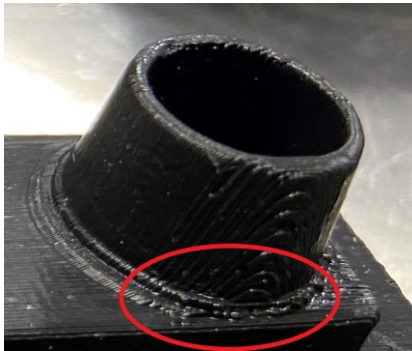
**Figura 5.9.9:** difetto nel sistema di fissaggio a clip durante lo stampaggio



Sempre per motivi di spessori troppo esili notiamo delle gravi deformazioni nella parte sottostante del collettore inferiore, infatti, la sezione che dovrà sorreggere la clip per il fissaggio del collettore nel foro non è in grado di sorreggere il materiale che le viene stampato sopra di essa, causando un'inclinazione che non permettono il suo utilizzo.



*Figura 5.10: difetto di inclinatura della clip*



Osservando attentamente la superficie del collettore inferiore, notiamo che l'estrusore non è stato in grado di creare il profilo alla base del foro di scarico che aveva lo scopo di rompigoccia. Questo perché l'altezza del profilo ha un valore più basso del valore di soglia minimo che l'ugello della stampante riesce a creare.

*Figura 5.11: mancanza di stampaggio del rompigoccia*

Questi difetti di stampaggio come descritto sopra sono derivanti da l'utilizzo di spessore non adeguati a questo tipo di tecnica o alla scelta di direzione di stampa che accentuano questi problemi. Il progettista, quindi, deve procedere ad aumentare gli spessori nelle zone interessate o perfino rimodellare la superficie interessata. In alternativa si può anche pensare di utilizzare un tipo di tecnica di stampaggio più preformante che consente di raggiungere precisioni e livelli di finitura più consoni, senza ricorrere alle accortezze elencate prima.

Dagli ultimi feedback coi tecnici della Nuova Simonella sappiamo che il componente è funzionante e permette in modo corretto il deflusso dei liquidi di scarico. Riguardo al suo montaggio, esso non presenta problemi sull'inserimento nel telaio della macchina ma per aumentare la tenuta delle due parti del collettore, i tecnici hanno dovuto inserire una fascetta tra la parte superiore e inferiore. Questo problema era abbastanza prevedibile in quanto ci siamo limitati ad adattare al meglio la clip per il componente, senza andare ad eseguire un vero e proprio dimensionamento del sistema, considerando magari le forze agenti sulle due clip.

## 5.4 Costi Finali dei Componenti

Andando infine a riassumere in un'unica tabella tutti costi che abbiamo calcolato precedentemente con il software LeanCost per lo stampaggio ad iniezione assieme ai costi preventivati dai siti online per la stampa 3D, possiamo ottenere delle preziose informazioni per il raggiungimento dell'obiettivo finale della tesi.

Quantità	Siti online				Iniezione
	PA 12 SLS	PA 12 MJF	ABS FDM	PC SLA	INIEZ. STAMPO NUOVO
1	52,16 €	38,40 €	36,28 €	160,80 €	7.390,00 €
10	19,33 €	16,94 €	11,85 €	62,14 €	1.099,60 €
100	14,22 €	11,75 €	7,75 €	42,35 €	111,04 €
1000	13,03 €	10,40 €	6,64 €	38,63 €	11,74 €
2000	13,03 €	10,40 €	6,64 €	38,63 €	6,25 €

*Figura 5.12: tabella per il confronto dei costi del collettore di scarico*

Nella tabella in alto, possiamo notare con estrema facilità il confronto tra le diverse tecnologie di AM che abbiamo considerato e il già in uso stampaggio ad iniezione. Per quest'ultimo, per essere più in linea con il lavoro dell'azienda, abbiamo considerato anche i costi di iniezione che ha sostenuto e che sta tutt'ora sostenendo l'azienda utilizzando uno stampo già esistente per un componente e modificando per lo stampaggio del collettore, in modo da ridurre sensibilmente i costi.

### Osservazioni Finali:

- Dalla tabella notiamo subito l'elevata economicità della tecnologia Fdm. Come visto precedentemente non permette però di avere una precisione e finitura tale per stampare correttamente il componente e garantire il suo inserimento nella macchina.
- Per la produzione di lotti tra i 200-500 pezzi, non risulta conveniente né la creazione di uno stampo dedicato da zero, né l'acquisto di una macchina prestazionale come MJF o SLS, il cui prezzo verrà eventualmente ammortato con pezzi futuri. Possiamo pensare di far realizzare questi componenti alle stesse aziende da cui abbiamo preventivato questi costi.

- Per la produzione di lotti tra i 1000-2000 pezzi, risulta conveniente l'uso di tecnologie in AM come SLS o MJF utilizzando per entrambe, ad esempio, il Nylon 12. Ciò permette di lavorare con tolleranze più basse, ottenendo una precisione e finitura superficiale comparabile coi pezzi ottenuti dallo stampaggio ad iniezione con prezzi comparabili a quest'ultimo (*intorno ai 6/7€*) e con il sensibile vantaggio di ottenere l'intero lotto pochi giorni dopo la progettazione del componente.
- La progettazione del componente poteva essere migliorata al fine di andare a limitare lo spreco di materiale e ottimizzarlo per un determinato tipo di stampaggio con risultati economici sicuramente vantaggiosi. Questo non è stato reso possibile in quanto il componente su cui abbiamo lavorato era già stato progettato in passato per lo stampaggio ad iniezione e non è frutto di una progettazione orientata fin da subito all'utilizzo dell'AM.
- Per volumi produttivi superiori ai 2000 pezzi, risulta essere molto più conveniente l'utilizzo di uno stampo ad iniezione rispetto a tipologie di stampaggio più costose come Sls, Mjf o Sla. Risulta economicamente vantaggioso lo stampaggio in Fdm ma in questo caso si ripresenteranno le problematiche già descritte precedentemente.

# Capitolo 6: Conclusioni

---

Nella tesi sopra descritta siamo andati quindi a lavorare con l'azienda Nuova Simonelli in modo da poter determinare loro l'eventuale convenienza economica dell'utilizzo delle innovative tecniche di Additive Manufacturing per lo stampaggio di componenti plastici all'interno delle loro macchine per il caffè.

Per poter eseguire questa valutazione, siamo partiti dai disegni Cad dei componenti analizzati forniti dai progettisti dell'azienda già pensati per la produzione di essi mediante la classica tecnologia dello stampaggio ad iniezione.

Tramite l'uso di appositi software messi a disposizione dall'università per noi tirocinanti, siamo andati eseguire delle analisi economiche sui costi che l'azienda ha sostenuto per la creazione dei stampi metallici per lo stampaggio dei componenti analizzati, in modo da poter successivamente andare a confrontarli con quelli calcolati con il nuovo metodo di produzione in stampa 3D.

Per poter andare ad usufruire di questa tecnologia ed ottimizzarla per il componente in esame, siamo andati ad eseguire una riprogettazione del collettore in modo da renderlo più semplici per il montaggio e cercare di rendere la sua geometria più funzionale possibile, cercando di andare a risolvere gli eventuali suoi problemi durante il funzionamento della macchina del caffè.

Successivamente ottenuti i file Cad dei componenti ultimati dalla progettazione siamo andati ad eseguire ulteriori analisi su di essi, infatti, mediante dei software di slicing siamo stati in grado di poter simulare il processo di stampa additiva sulla falsa riga di come sarebbe stato poi eseguito all'interno dell'azienda.

Per il calcolo dei costi del processo invece abbiamo scelto di utilizzare due opzioni per ricavarceli in modo da poter avere in modo più dettagliato una stima del componente. Abbiamo scelto di andare a preventivare il costo del componente utilizzando dei software online, messi a disposizione gratuitamente delle aziende che stampano componenti in additive, in cui basta inserire il file nel formato descritto assieme le informazioni sul tipo di stampaggio da analizzare ed il programma in pochi secondi permette di darci una stima di costo del componente e dell'intero lotto produttivo.

Per una stima del costo del componente, il mio collega ha utilizzato dei appositi modello di costo, i quali mediante l'uso di appositi calcoli e parametri, permettono di ottenere il valore del componenti in modo molto accurato.

Una volta ottenuti questi risultati, siamo andati ad analizzarli in modo da poter andare a determinare i possibili scenari che potevano portare un vantaggio

economico all'impresa intraprendendo questa tecnologia, infatti, da come è descritto nella tabella dei costi (*figura 6.13*) del capitolo precedente, possiamo affermare che l'utilizzo di questa tecnologia è molto dipendente dal tipo di volume produttivo che vogliamo produrre, infatti essa risulta più vantaggiosa per lotti di produzione tra 1000-2000 pezzi in modo da poter ammortizzare il costo della macchina su un numero maggiore di pezzi, rispetto all'utilizzo di uno stampo costruito da zero, in più questo ammortamento andrà sostenuto dall'utilizzo futuro della macchina.

Se consideriamo invece l'utilizzo di uno stampo modificato precedentemente da uno già utilizzato per un vecchio lotto di produzione è evidente che i costi della modifica sono sensibilmente più bassi rispetto l'acquisto di una macchina 3d, in più il costo dello stampo è stato ammortizzato su un volume produttivo molto più ampio, andato a rendere il componente più economico. Ciò comunque non mette in discussione l'enorme versatilità della stampante 3D rispetto la creazione di stampi dedicati, per i lotti di produzione futuri.

In futuro può essere interessante non andare a lavorare su un componente già esistente, progettato appositamente per lo stampaggio ad iniezione, ma bensì andare a ripensare completamente l'oggetto per crearlo con l'AM in modo poter modellare appositamente la forma per garantire un migliore fissaggio sul telaio della macchina. Oppure rimodellare il volume interno del collettore di scarico e con apposite simulazioni fluidodinamiche andare a migliorare il deflusso dei liquidi che lo attraversano.

# Bibliografia

---

- 1- *Aspetti Generali dell'Additive Manufacturing*  
<https://3d4growth.com/additive-manufacturing#Additive-Manufacturing>
- 2- *Il Progettista industriale*  
<https://www.ilprogettistaindustriale.it/additive-manufacturing-una-storia-di-brevetti/>
- 3- *Italia 3d Print*  
<https://www.italia3dprint.it/limiti-della-stampa-3d-fdm/>
- 4- *Settore AM nell'industria odierna*  
<https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/healthcare-additive-manufacturing-market>
- 5- *Materiali AM*  
<https://felfil.com/it/?v=5ea34fa833a1>
- 6- *Protolabs*  
<https://www.protolabs.it/risorse/suggerimenti-di-progettazione/materiali-per-la-stampa-3d/>
- 7- *Linee guida per la progettazione in AM*  
<https://www.binarioprint.it/stampa-3d-preventivo-online/stampa-3d-polveri-sls-sinterizzazione/>
- 8- *3dnextech*  
<https://www.3dnextech.com/3d-print-finishing-what-are-the-solutions/>
- 9- *Guida alla modellazione*  
<http://www.stampa3dmantova.it/guida-modellazione-stampa3d>
- 10- *Catalogo Clip*  
<https://www.yumpu.com/it/document/read/63940663/cat-18>
- 11- *Catalogo*  
[https://www.politesi.polimi.it/bitstream/10589/44942/1/2012\\_04\\_Rizzardi.pdf](https://www.politesi.polimi.it/bitstream/10589/44942/1/2012_04_Rizzardi.pdf)
- 12- *3dHubs*  
<https://www.3dhubs.com/>
- 13- *FormLabs*  
<https://formlabs.com/it/>
- 14- *Materialise*  
<https://www.materialise.com/>
- 15- *3D Systems*  
<https://it.3dsystems.com/>