



**UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE**

**FACOLTA' DI INGEGNERIA**

---

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Meccanica

**Analisi delle tecnologie di Additive Manufacturing per la produzione in serie**

**Analysis of Additive Manufacturing technologies for mass production**

Relatore:

Prof. Ing. **Michele Germani**

Tesi di Laurea di:

**Luca Mazzanti**

Correlatore:

Prof. Ing. **Marco Mandolini**

A.A. 2019 /2020



## Sommario

1	Introduzione .....	5
2	Componenti analizzati .....	6
3	Lo stampaggio ad iniezione .....	7
3.1	Il processo di Stampaggio ad iniezione.....	7
3.1.1	Introduzione .....	7
3.1.2	Ciclo macchina .....	7
3.2	Lo Stampo.....	8
3.3	Analisi dei costi dello stampaggio ad iniezione .....	8
3.3.1	Costo dello stampo.....	8
3.3.2	Costi del processo.....	9
3.3.3	Ulteriori costi .....	9
3.4	LeanCOST.....	9
3.5	Costi dei componenti.....	10
3.5.1	Costi del processo.....	10
3.5.2	Costi dello stampo .....	10
3.5.3	Costi del materiale.....	11
3.5.4	Costi Attuali della Nuova Simonelli.....	12
3.5.5	Confronto tra i dati di LeanCOST e i costi attuali effettivi .....	12
4	Additive Manufacturing.....	14
4.1	Introduzione .....	14
4.2	Additive Manufacturing Workflow .....	14
4.3	Le tecnologie .....	14
4.3.1	Fused Deposition Modeling (FDM).....	14
4.3.2	Selective Laser Sintering (SLS) .....	16
4.3.3	Stereolithography (SLA).....	17
4.3.4	Multi-Jet Fusion (MJF) .....	18
4.3.5	Materiali .....	19

4.3.6	Tolleranze .....	21
4.3.7	Confronto materiali e tecnologie .....	21
4.4	Progettazione in ottica di processi di Additive Manufacturing .....	22
4.4.1	Introduzione .....	22
4.4.2	Ottimizzazione topologica .....	22
4.4.3	Disegno della struttura multi-scala.....	22
4.4.4	Consolidamento parti .....	23
4.4.5	Riprogettazione dei componenti della Nuova Simonelli .....	23
4.5	Analisi economica attraverso siti web di produttori .....	26
4.5.1	I Siti web .....	26
4.5.2	Risultati delle valutazioni economiche .....	28
4.5.3	Costi unitari per il collettore.....	30
4.6	Modelli di costo .....	32
4.6.1	Modello di costo per Fusion Deposition Modeling .....	32
4.6.2	Modello di costo per stereolitografia .....	36
4.6.3	Modello di costo per Selective Laser Sintering.....	39
4.6.4	Analisi modello di costo per Multi-jet Fusion.....	42
5	Considerazioni finali .....	44
6	Conclusioni .....	46
	Bibliografia.....	47
	Sitografia.....	47

# 1 Introduzione

In questa trattazione verrà affrontata la tematica dell'additive manufacturing in ambito industriale. Nello specifico, verrà fatta un'analisi economica della riprogettazione in ottica di additive manufacturing di due particolari, partendo da una produzione attualmente svolta per stampaggio ad iniezione, analizzandone vantaggi e svantaggi ed in particolare valutandone i costi di produzione.

Siamo partiti analizzando i componenti e come sono prodotti, ovvero per stampaggio ad iniezione; abbiamo studiato questo processo e come sono ripartiti i costi. Successivamente abbiamo esaminato come e se i particolari potevano essere riprogettati, valutandone i materiali, le tecnologie di Additive Manufacturing adatte e confrontando gli investimenti con quelli attuali.

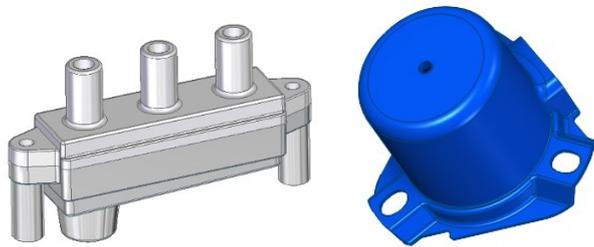
Il lavoro di valutazione è stato svolto, anche come esperienza di tirocinio, su due componenti di una macchina di caffè della Nuova Simonelli. I particolari sono un copri-resistenza e un collettore di acque di scarico.

L'obiettivo è vedere se e in che modo le tecnologie di additive manufacturing, un settore in grande evoluzione, sono in grado di sostituire i processi tradizionali come lo stampaggio ad iniezione, non solo nel caso dei due componenti assegnatici dalla Nuova Simonelli, ma facendo anche una valutazione più generale per capire le potenzialità di questi nuovi sistemi per poterle poi applicare al meglio.

La tesi è divisa principalmente in due parti: nella prima analizzeremo lo stato attuale dei componenti e il processo di stampaggio ad iniezione, confrontando i costi ottenuti dal software LeanCOST con quelli attuali dell'azienda; nella seconda approfondiremo le tecnologie di additive manufacturing che ci interessano per la produzione: ricavando dei costi da dei siti online e confrontandoli con quelli dei modelli di costo costruiti da noi o presi da terzi.

## 2 Componenti analizzati

Come già detto nell'introduzione i pezzi che l'azienda ci ha chiesto di valutare sono attualmente prodotti per stampaggio a iniezione. Entrambi i componenti non hanno funzioni strutturali e non sono soggette a forze o pressioni particolari. Il copri-resistenza ha una funzione di sicurezza e serve a coprire, appunto, una resistenza, mentre il collettore ha il compito di raccogliere l'acqua e una quantità minima di vapore di scarico provenienti da tre tubi di acque di scarico. Il collettore di scarico è composto in due parti e dev'essere possibile smontarlo durante la manutenzione. Entrambi i componenti devono essere inseriti nella macchina senza modificare il luogo dove vanno montati. Infine, il materiale con cui devono essere fatti deve avere buona resistenza al calore, all'umidità e all'acqua inoltre dev'essere rigido. Attualmente sono prodotti in propilene.



*Fig. 1.1 Collettore di acque di scarico (sinistra) copriresistenza (destra)*

## 3 Lo stampaggio ad iniezione

### 3.1 Il processo di Stampaggio ad iniezione

#### 3.1.1 Introduzione

Il processo di stampaggio ad iniezione è la tecnologia più importante tra quelle utilizzate per formare i materiali plastici. Possono essere stampati manufatti da 1 mg fino a più di 10 kg di peso, con tempi-ciclo che variano da pochi secondi fino a qualche minuto. Come si può vedere nella fig. 2, il processo inizia inserendo il materiale plastico, sotto forma di pallet (granuli) o più raramente di polveri, attraverso una tramoggia, in un cilindro riscaldato in cui è contenuta la vite di alimentazione. Ponendo in rotazione la vite, visibile nella fig.2, i granuli vengono forzati a muoversi dal punto di alimentazione fino al punto di iniezione. Durante tale percorso, il materiale viene riscaldato fino alla temperatura di fusione per mezzo di resistenze elettriche e viene impastato per mezzo della rotazione della vite.

Quando il materiale fuso si trova in corrispondenza del punto di iniezione, la vite viene fatta retrocedere in modo da immagazzinare il giusto quantitativo di fuso per poi essere spinta in avanti idraulicamente come un pistone, iniettando all'interno della cavità dello stampo il materiale fuso. Le pressioni massime che si raggiungono al termine della fase di iniezione sono solitamente comprese tra 70 e 200 MPa.

La pressione che si genera viene mantenuta finché non si è solidificato il punto di iniezione, quindi si provvede all'apertura degli stampi e all'estrazione del pezzo che cadrà in un apposito stampo o verrà raccolto da un manipolatore. Le due metà dello stampo vengono successivamente richiuse e il processo viene ripetuto automaticamente. Iniettando il materiale fuso, si possono ottenere delle forme complesse aventi anche cavità in sottosquadro e con una buona accuratezza dimensionale. Nella maggior parte dei casi i pezzi che vengono prodotti non necessitano di lavorazioni aggiuntive.

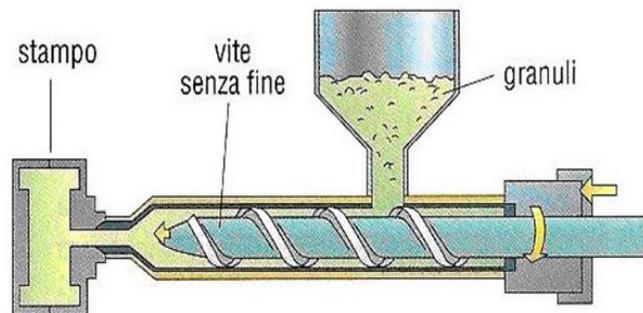


Fig. 2: Come funziona lo stampaggio ad iniezione

#### 3.1.2 Ciclo macchina

Il ciclo macchina tipico è composto dalle seguenti fasi:

1. caricamento e fusione: la vite gira prelevando il materiale che, avanzando verso la testa del cilindro, fonde per effetto del riscaldamento del cilindro e dell'attrito;
2. l'accumulo del materiale nella parte anteriore del cilindro fa arretrare la vite, determinando la quantità di materiale che verrà iniettata;
3. chiusura e bloccaggio dello stampo: i due semi-stampi vengono avvicinati e vengono bloccati in posizione di massima forza di chiusura;

4. iniezione: la vite spostandosi rapidamente in avanti, come un pistone, forza il materiale fuso, attraverso l'ugello, nella cavità dello stampo;
5. mantenimento in pressione: la vite continua ad essere spinta in avanti mantenendo la pressione sul materiale finché questo non è solidificato, facendo così si riesce a compensare il ritiro in fase liquida del materiale plastico;
6. rilascio della pressione della vite;
7. rotazione della vite per preparazione al nuovo ciclo;
8. apertura dello stampo ed estrazione / espulsione del pezzo.

Le moderne presse ad iniezione sono attrezzate con diversi sensori che permettono di controllare la temperatura della tramoggia, del cilindro di iniezione e dello stampo, la corsa della vite durante l'iniezione, la velocità di avanzamento della vite, di iniezione e post-iniezione. Si possono mantenere in questo modo costanti i parametri di stampaggio ad iniezione considerati ottimali, in modo che possa essere garantita una costante qualità del manufatto.

## 3.2 Lo Stampo

È l'elemento che caratterizza il processo e l'intero impianto di stampaggio ad iniezione. Ne esistono molte tipologie differenti per complessità e dimensioni. Si compone di una parte fissa (cavity plate) in cui il polimero viene iniettato, ed una parte mobile (core plate). Il polimero viene iniettato nello stampo attraverso un condotto centrale rastremato (sprue). La piastra mobile (core plate) comprende il nucleo che determina la geometria dei pezzi stampati, ed è collegata alla piastra di supporto. La piastra di supporto è a sua volta fissata alla struttura ad U che ospita agli eiettori. La struttura ad U è vincolata con bulloni alla piastra mobile e fornisce lo spazio necessario all' estrazione dei pezzi. Entrambi i lati dello stampo sono provvisti di un circuito di raffreddamento. Negli stampi con più cavità, il condotto di alimentazione alimenta un condotto comune che alimenta a sua volta le differenti cavità. Nel momento della estrazione il polimero incluso nelle cavità e nei diversi condotti viene estratto integralmente il che richiede di dover spendere del tempo per separare i pezzi dai materiali di scarto.



*Fig. 3: Stampo*

## 3.3 Analisi dei costi dello stampaggio ad iniezione

### 3.3.1 Costo dello stampo

Al di fuori della macchina per lo stampaggio, lo stampo è l'investimento maggiore che caratterizza questo processo; in base al numero di figure, alla complessità della geometria, al sistema di alimentazione e al sistema di raffreddamento si ha un aumento o una riduzione del costo: maggiore è la complessità dello stampo, maggiore saranno i costi di investimento ad esso associati.

La prima formula per ricavare il costo dello stampo è  $C_{\text{simpr}} = C_{\text{prog}} + C_{\text{fabbr}} + C_{\text{coll}}$  che calcola il costo dello stampo riferito ad una singola figura stampata.  $C_{\text{prog}}$  si riferisce al costo del progetto,  $C_{\text{fabbr}}$  al costo di fabbricazione dello stampo a singola impronta, mentre  $C_{\text{coll}}$  è il costo per il collaudo dello stampo finito. Delle tre voci indicate, l'unico che può essere calcolato analiticamente è il costo di fabbricazione che comprende al suo interno il costo delle singole piastre e il costo di lavorazione; gli altri due costi vengono stimati: se il costo di fabbricazione comprende il 70% del costo dello stampo, allora si stima  $C_{\text{prog}} + C_{\text{coll}} = 30\%$  il restante del costo totale dello stampo. Il costo totale dello stampo sarà

$$C_{\text{stampo}} = C_{\text{simpr}} \times i^m \quad \text{dove } i \text{ è il numero delle impronte e } m \text{ un coefficiente, solitamente pari a } 0,7$$

Il numero delle impronte incide notevolmente sul costo dello stampo, ma più sono le impronte, e quindi il numero dei pezzi per stampato, minore sono i tempi di processo per pezzo e quindi diminuisce anche il costo di processo. Quindi è importante valutarne bene il numero, che dipende dal tempo di ciclo, il numero di pezzi minimo da stampare e dal costo dello stampo per singola impronta. In questa immagine si può notare come variano i costi di stampaggio, il costo dello stampo e il costo totale variando il numero delle impronte.

### 3.3.2 Costi del processo

Riguarda il costo per la trasformazione da materia prima a prodotto finito. Si calcola moltiplicando il costo orario della macchina per il tempo di ciclo, diviso poi per il rendimento totale moltiplicato per il numero delle impronte. Il costo orario della macchina dipende dalla pressione necessaria per realizzare correttamente il componente. Il rendimento totale tiene conto dell'errore umano, della macchina e degli scarti cautelando da una sovrastima della capacità produttiva.

$$C_{\text{processo}} = (C_{\text{macch}} \times t_c) / (i \times \mu_{\text{tot}})$$

### 3.3.3 Ulteriori costi

Gli altri costi che caratterizzano il processo sono:

- Costo della manodopera. Si intende il costo per un singolo operatore all'ora;
- Costo per l'acquisto di materie prime necessarie a sostenere la produzione;
- Costo dell'energia elettrica.
- Costi di Manutenzione

## 3.4 LeanCOST

Prima di ricevere l'effettivo costo dei componenti, abbiamo ottenuto dei preventivi, attraverso l'utilizzo di un software: LeanCOST. LeanCOST è un software in grado di supportare la certificazione, riconoscendo automaticamente la geometria del modello CAD 3D, e associa un ciclo di lavorazione fornendo come output una stima oggettiva di tempi e costi di produzione, confrontando scenari alternativi in funzione delle quantità, delle disponibilità delle macchine e della fattibilità.

Per prima cosa è stata caricato il modello CAD del pezzo in formato .step fornito dalla Nuova Simonelli; il software riconosce le forme, le dimensioni, gli spessori del componente e la presenza di eventuali sottosquadri; richiede d'inserire le tolleranze necessarie, il materiale e il colore con cui si desidera stampare e la rifinitura finale. Inoltre, richiede il numero delle impronte e il volume di produzione.

In base a questi parametri il software ci dice il costo dello stampo, i costi di processo e il costo del materiale.

Il costo del processo è costituito da:

- costo di setup, determinato dal tempo che ci vuole a preparare la macchina: i tempi di raffreddamento, i tempi di carico e scarico e la prova della produzione
- costi di produzione
- costo orario della macchina
- costo dell'operatore

### 3.5 Costi dei componenti

La costificazione dei componenti è stata fatta ipotizzando diversi scenari produttivi, variando volume produttivo, pezzi per lotto e numero di impronte dello stampo.

Per il copriresistenza sono stati ottenuti i costi per:

- volume produttivo di 1000 pezzi, con lotti da 200 e stampo con un'impronta.
- volume produttivo di 3000 pezzi, con lotti da 600 e stampo con un'impronta.
- volume produttivo di 5000 pezzi, con lotti da 1000 e stampo con una o due impronte

Mentre per il collettore, ipotizzando due stampi diversi per le due parti, è stata fatta la simulazione con:

- volume produttivo di 3000 pezzi, con lotti da 600 e stampo con un'impronta.
- volume produttivo di 9000 pezzi, con lotti da 1800 e stampo con un'impronta.
- volume produttivo di 15000 pezzi, con lotti da 3000 e stampo con una o due impronte.

#### 3.5.1 Costi del processo

##### 3.5.1.1 Copri-resistenza

Nel caso del copri-resistenza, per una singola impronta, il costo del processo è per circa il 75% costituito dai costi di setup, in quanto la macchina utilizzata è di 50 kN, con un costo orario di soli 11 €/h. Inoltre, il tempo di produzione per singolo pezzo equivale a poco più di una decina di secondi. Portando a due il numero delle impronte, diminuisce il tempo di produzione, ma è necessaria una macchina con una forza maggiore (140 kN, con un costo orario di 18€/h) e inoltre aumenta il costo di setup, facendo sì che il costo di processo rimanga praticamente uguale per il volume produttivo scelto.

##### 3.5.1.2 Collettore

Simulando i processi di produzione per i due pezzi del collettore, si è notato che sono simili, infatti, per entrambi le parti, con lo stampo formato con un'impronta, è necessaria una pressa da 50 kN. Portandolo a due impronte, la forza necessaria è di 80 kN, con un costo orario di 13 €/h. Per questo, per quanto riguarda il processo, si ha una diminuzione dei costi.

#### 3.5.2 Costi dello stampo

Come già detto precedentemente, il costo dello stampo dipende principalmente dalle dimensioni, dalla complessità delle forme e dal numero delle impronte. Per le parti del collettore, con geometrie abbastanza semplici e di dimensioni ridotte, il costo dello stampo è abbastanza contenuto. Mentre per il copri-resistenza aumenta. Ovviamente, aumentando il numero delle impronte aumentano i costi dello stampo per tutte e due i componenti, però nel caso delle parti del collettore uno stampo a due impronte risulta conveniente in quanto i

costi di processo non aumentano, mentre per il copriresistenza è necessaria una pressione molto maggiore e quindi un costo orario della macchina maggiore.

### 3.5.3 Costi del materiale

I componenti sono realizzati in Polipropilene, polimero termoplastico, dal costo di circa 2,50 € al Kg. Il copriresistenza ha una massa di circa 0,02 Kg per cui il costo per pezzo di materiale è di circa 0,05€. Mentre i pezzi del collettore sono ancora più piccoli per cui il costo del materiale per pezzo è di solo 0,01€.

	Lotto	Volume produttivo	Cavità stampo	Costo materiale	Costo processo	Costo totale	Costo stampo	Costo stampo per pezzo	Costo totale con stampo
5000656	200	1000	1	€ 0,05	€ 0,44	€ 0,49	€ 12.542,00	€ 12,54	€ 13,03
	600	3000	1	€ 0,05	€ 0,18	€ 0,23	€ 12.542,00	€ 4,18	€ 4,41
	1000	5000	1	€ 0,05	€ 0,13	€ 0,18	€ 12.542,00	€ 2,51	€ 2,69
	1000	5000	2	€ 0,05	€ 0,14	€ 0,19	€ 14.900,00	€ 2,98	€ 3,17
5000670	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
5000672	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

Tab.3.1 prezzi unitati ottenuti da LeanCOST

Tabelle prezzi al variare di volume di produzione, pezzi per lotto, e numero di cavità



Tab 3.2 e 3.3: distribuzione dei costi ottenuti da LeanCOST per il copriresistenza (a sinistra) e per il collettore (a destra)

Come è visibile nei grafici qui sopra si può vedere come nel caso dei costi copriresistenza il costo dello stampo rappresenta la maggior parte del costo totale, con i costi di materiale e di processo praticamente irrilevanti; ciò comporta un sensibile aumento del costo totale quando si va ad aumentare il numero delle impronte e quindi il costo dello stampo. Per le due parti del collettore i costi riguardanti il processo rappresentano una percentuale più alta nel costo totale. Aumentando il numero delle impronte questi diminuiscono, con il costo dello stampo che aumenta e quindi la soluzione ad un'impronta sembra essere ancora la soluzione migliore, anche se in questo caso di pochi centesimi.

Si può, per tutti e tre le parti, verificare immediatamente come il prezzo del materiale non incida sui costi di produzione.

### 3.5.4 Costi Attuali della Nuova Simonelli

Successivamente l'azienda ci ha detto quali sono i parametri con cui realizza i suoi componenti e quali sono i costi.

- Collettore

Le due parti del collettore vengono realizzate con un solo stampo contemporaneamente. Quest'ultimo è stato ottenuto modificando un altro già esistente, con un costo molto più basso rispetto a quanto sarebbe costato farne uno da capo, con un prezzo di 2990 €. I costi di produzione dipendono dalla grandezza del lotto: se il lotto è superiore a 500 pezzi, il costo per singolo pezzo è di 0,60 €, se il lotto è superiore a 1000 pezzi il costo scende a 0,38€.

- Copri-resistenza

Il costo dello stampo per il copri-resistenza è di 7000€ e non ci sono state date altre informazioni sul come è stato realizzato. Il costo di produzione per singolo pezzo è di 0,45 € per lotti da 2000 e di 0,38 € per lotti da 4000 pezzi.

### 3.5.5 Confronto tra i dati di LeanCOST e i costi attuali effettivi

Si può notare come i costi effettuati dalla Nuova Simonelli, siano più bassi rispetto a quelli ottenuti da LeanCOST. Ciò è dovuto principalmente al fatto che gli stampi non sono nuovi, ma ottenuti modificandone altri. I costi di produzione, invece, sono simili per quanto riguarda il copriresistenza, ma minori per il collettore.

Costo Stampo		2.990,00 €	Costo Stampo		7.000,00 €
Collettore 1+1			Copriresistenza		
Q.tà	Costo per unità		Q.tà	Costo per unità	
10	300,20 €		10	700,90 €	
25	120,80 €		25	280,90 €	
50	61,00 €		50	140,90 €	
100	31,10 €		100	70,90 €	
200	16,15 €		200	35,90 €	
300	11,17 €		300	24,23 €	
400	8,68 €		400	18,40 €	
500	6,74 €		500	14,90 €	
1000	3,75 €		1000	7,90 €	
2000	2,26 €		2000	4,28 €	
3000	1,76 €		3000	3,11 €	
4000	1,51 €		4000	2,53 €	
5000	1,36 €		5000	2,18 €	
10000	1,06 €		10000	1,48 €	

Tab. 3.4: Costi unitari attuali del collettore (sinistra) e costi unitari attuali del copriresistenza (destra)

Per il copriresistenza la differenza maggiore riguarda soprattutto i volumi produttivi più piccoli, ciò è dovuto principalmente al costo dello stampo. Per le due parti del collettore, oltre al costo dello stampo più basso, in LeanCOST sono maggiori anche i costi di processo. Infatti, nonostante siano stati considerati volumi produttivi maggiori e quindi il costo dello stampo avrebbe dovuto incidere meno, i costi ottenuti da LeanCost per 15000 pezzi risultano il doppio di quelli attuali della Nuova Simonelli.

Copriresistenza		
Volume produttivo	Costi LeanCOST	Costi attuali
1000	13,03 €	7,90 €
3000	4,41 €	3,11 €
5000	2,69 €	2,18 €
Collettore 1+1		
Volume produttivo	costi LeanCOST	Costi Attuali
3000	5,93 €	3,75 €
9000	2,55 €	1,36 €
15000	1,87 €	0,96 €

*Tab 3.5 confronto tra i costi attuali dell'azienda e quelli ottenuti da LeanCOST*

Per il confronto successivo con i sistemi di Additive Manufacturing verranno presi in considerazione entrambi i costi: quelli ottenuti da LeanCOST ci permetteranno di avere un confronto più generale tra lo stampaggio ad iniezione e le tecnologie AM, mentre i costi attuali sono stati usati per poter dire all'azienda Nuova Simonelli con quale tecnica le converrà produrre i propri pezzi in base alla grandezza del lotto.

## 4 Additive Manufacturing

### 4.1 Introduzione

Per Additive Manufacturing s'intende un set di tecnologie produttive che permettono di realizzare oggetti tridimensionali attraverso la sovrapposizione graduale di materiale strato per strato. Queste tecniche nascono negli USA nella seconda metà del '900, quando nel 1986 Charles W. Hull depositò il brevetto della prima tecnologia di Additive Manufacturing, la stereolitografia: un metodo e le relative attrezzature per realizzare oggetti solidi attraverso la stampa di sottili strati, uno sopra l'altro, di un materiale polimerizzabile, per esempio una radiazione UV.

Una delle prime applicazioni di queste tecnologie fu la prototipazione rapida (RP), intesa come una nuova tecnica per la fabbricazione di prototipi, che sino a quel momento trovavano nelle lavorazioni tradizionali l'unica tecnica di fabbricazione, capace di ridurre i costi di industrializzazione e i tempi di sviluppo di un prodotto.

Solo con il passare del tempo e lo sviluppo delle tecnologie si è arrivati a poter produrre veri e propri pezzi finiti e funzionali. Ancora oggi, però, queste nuove tecnologie vengono usate principalmente per prototipi, visto che non vengono valorizzati i vantaggi che questo mondo può dare.

### 4.2 Additive Manufacturing Workflow

Il prodotto viene modellato con un sistema CAD-CAM (computer-aided-design– computer-aided-manufacturing) e viene rappresentato come superfici chiuse che a loro volta definiscono un ambiente chiuso. I dati devono specificare in modo molto accurato l'interno, l'esterno e i confini del modello.

Il modello viene poi convertito in un file di formato STL (Stereo Lithography interface format), che origina da 3D Systems. Il formato STL approssima la superficie del modello con dei poligoni. Un programma al computer, in seguito analizza il file STL che definisce il modello da costruire e lo suddivide ("taglia") in sezioni trasversali. Queste sezioni trasversali sono sistematicamente ricreate mediante la solidificazione di liquido o polvere per formare il modello 3D.

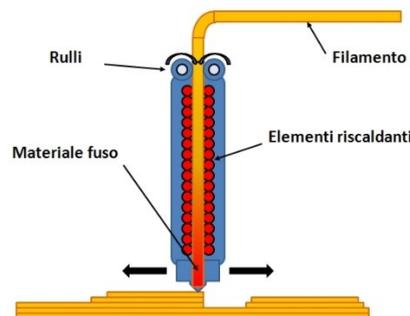
### 4.3 Le tecnologie

Esistono diverse classificazioni, ma le più comuni suddividono le tecnologie di additive manufacturing sulla base del materiale di partenza. Si avranno dunque: sistemi basati su materiale liquido, come la stereolitografia; sistemi basati su materiale solido, come il fused deposition modeling; sistemi basati su materiale polveroso, come la sinterizzazione laser e multi-jet fusion. In questa trattazione vengono approfondite le tecnologie che ci interessano per la produzione dei componenti con materiali polimerici,

#### 4.3.1 Fused Deposition Modeling (FDM)

Questa tecnologia di additive manufacturing è stata inventata da Scott Crump nel 1989. L'efficacia di questo sistema lo ha portato a fondare Stratasys, azienda divenuta al giorno d'oggi un leader dei sistemi di additive manufacturing. Volendo essere precisi, il termine "Fused Deposition Modeling" è un marchio registrato Stratasys e sarebbe più corretto parlare di "material extrusion" in riferimento a queste tecnologie. Tuttavia, il termine risulta essere largamente utilizzato per riferirsi alle tecnologie che prevedono un'estrusione del materiale da un ugello ed è sostanzialmente diventato uno standard de facto per riferirsi a queste tecnologie, seppur non sia del tutto corretto. In quest'ambito verranno usati entrambi i termini con riferimento generale ai sistemi basati sull'estrusione di materiale. Questa tecnologia è probabilmente la più facile da capire a livello

logico, in quanto consiste nella deposizione del materiale strato su strato tramite un ugello. Il materiale, sotto forma di filamento plastico o metallico, viene fatto passare all'interno di un estrusore composto dal sistema di alimentazione del materiale e dall'ugello riscaldante. L'estrusore fonde il materiale e provvede a depositarlo sul piano di lavoro per formare lo strato. Una variante, anch'essa utilizzata, prevede che il materiale non sia sotto forma di filo, ma in pellets che alimentano la macchina. Il funzionamento comunque non viene modificato. L'ugello di stampa si muove in orizzontale e in profondità (assi X e Z) per permettere la stampa completa dello strato, mentre il piano di lavoro si sposta verso il basso (asse Y) per permettere la sovrapposizione degli strati e quindi la stampa di oggetti tridimensionali. Anche qui esistono alcune varianti, in cui ad esempio è solo il piano di lavoro o solo l'ugello a muoversi nei tre assi, tuttavia il concetto base rimane identico. L'ugello, come visibile nella fig. 4.1, fonde e mantiene il materiale ad una temperatura appena superiore al suo punto di fusione, in modo che una volta stampato solidifichi immediatamente. Questo permette che il materiale non coli quando viene depositato poiché la solidificazione è quasi istantanea.



*Fig. 4.1 funzionamento della tecnologia FDM*

La tecnologia FDM ha importanti vantaggi per quanto riguarda l'economicità della macchina, non essendo necessari laser come negli altri sistemi di stampa 3D. Non richiede inoltre materiali costosi ed è efficace con materiali plastici, ma i metalli utilizzabili devono avere bassi punti di fusione e sono quindi poco resistenti rispetto a quelli utilizzabili con altre tecnologie. A questo proposito, si ritiene che siano stati fatti pochi sforzi nello sviluppo di materiali metallici utilizzabili con la tecnologia FDM.

Tramite i software CAD è possibile creare un oggetto che deve poi essere pre-processato per creare virtualmente gli strati che poi saranno stampati dalla macchina. Gli strati possono avere uno spessore che va da 0,13 mm a 0,33 mm, mentre le stampanti più sofisticate possono raggiungere 0,08 mm. L'utilizzo della tecnologia FDM, però, richiede spesso una successiva lavorazione, oltre alla rimozione dei supporti, subito dopo la stampa sono visibili gli strati ed è quindi necessaria una finitura automatica o manuale per rendere l'oggetto perfetto.

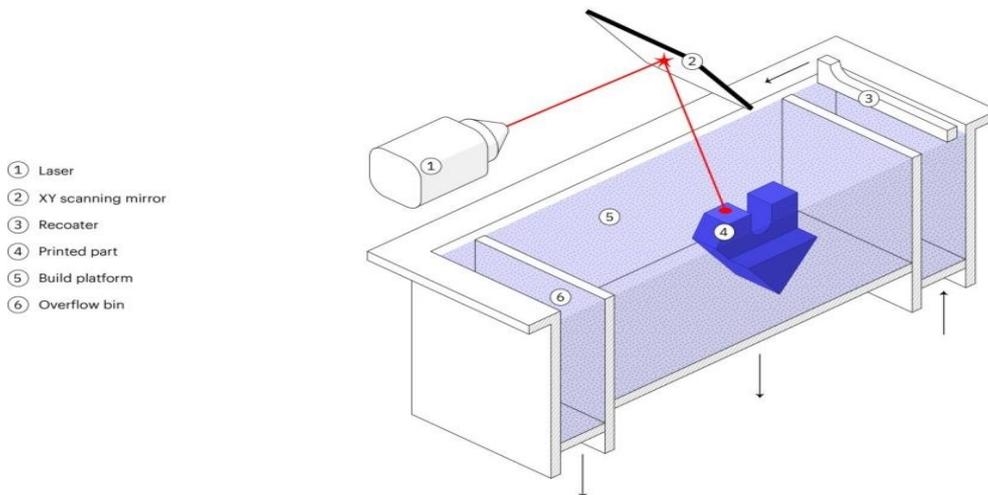
La stampante possiede solitamente due ugelli, uno utilizzato per stampare il materiale di composizione del prodotto, l'altro per stampare il materiale di supporto. Il materiale di supporto è necessario per garantire che il prodotto, o una sua parte, non collassi durante la stampa o possa andare fuori posizione. Si crea quindi una specie di impalcatura che mantiene l'oggetto stabile e che deve essere rimossa alla fine della lavorazione. I supporti sono facilmente rimovibili per prodotti semplici, mentre si presenta qualche difficoltà in più per oggetti complessi con zone non facilmente accessibili. Per ovviare a questo problema le maggiori aziende specializzate permettono la stampa, abbinata solo ad alcuni tipi di materiali, di elementi di supporto solubili che possono quindi essere rimossi tramite lavaggio del prodotto in una soluzione a base d'acqua. In questo modo, indipendentemente dalla complessità del prodotto, il materiale di supporto può essere facilmente eliminato dal prodotto.

Viene evidenziato come sia importante l'orientamento dell'oggetto al fine evitare, se possibile, l'utilizzo del materiale di supporto che richiede una successiva lavorazione per essere rimosso. Si può dare un esempio molto semplice, ma al tempo stesso efficace. Supponendo di voler stampare la lettera 'T', sarebbe necessario

del materiale di supporto durante la stampa per garantire che il tratto orizzontale della lettera non collassi. Se però si considera che la stessa lettera può essere stampata anche rovesciata, senza richiedere la deposizione di materiale di supporto, si capisce come l'orientamento dell'oggetto sia fondamentale per agevolare la post-lavorazione e la stampa.

#### 4.3.2 Selective Laser Sintering (SLS)

Il funzionamento di questa tecnologia di additive manufacturing si basa sulla fusione del materiale sotto forma di polvere da parte di un laser che disegna le geometrie dell'oggetto. Come primo passaggio viene steso uno strato di polvere sulla superficie di lavoro. Successivamente il laser sinterizza la polvere seguendo il disegno e la forma previsti dal modello 3D e creando quindi un primo livello del prodotto finale. Una volta creato il primo strato viene abbassata la superficie di lavoro e stesa un'ulteriore quantità di polvere che viene successivamente colpita dal laser secondo la forma prevista per il secondo strato e andando così a unire il nuovo strato a quello precedente. Ovviamente, la polvere deve essere stesa su tutta la superficie stampabile per garantire la massima libertà di stampa ed è quindi intuibile che solo una piccolissima parte della polvere sarà effettivamente utilizzata per la stampa. Il prodotto finito risulterà immerso nella polvere vergine non utilizzata, che potrà però essere recuperata per creare nuovi prodotti. Questa caratteristica funzionale produce anche un vantaggio non trascurabile, riguardante la possibilità di stampare oggetti senza strutture di supporto come è obbligatorio nelle altre tecnologie. È la polvere stessa, infatti, a svolgere il ruolo di supporto, evitando che l'oggetto in fase di creazione si possa spostare o sbilanciare. La polvere deve essere molto fine e, generalmente, si parla di un ordine di grandezza di  $50\ \mu\text{m}$  (micrometri, pari a  $0,05\text{ millimetri}$ ). Nella figura sotto stante si può vedere uno schema di come funziona approssimativamente una stampante SLS.



*Fig. 4.2 schema stampante SLS*

Un processo del tutto analogo, ma più efficace, è il processo di Selective Laser Melting. Il sistema SLS non fonde tra loro le particelle di materiale puro, ma le unisce tramite la fusione di un materiale aggiuntivo che va mescolato alla polvere pura e svolge la funzione di collante. Il processo SLM, invece, fonde direttamente tra loro le particelle di materiale plastico, metallico o ceramico, creando oggetti di qualità e resistenza superiori. Il funzionamento è comunque analogo e spesso i due termini vengono utilizzati alternativamente, pur non essendo procedimenti identici. Inoltre, nonostante il SLM possa essere usato anche con altri materiali, questa particolare dicitura viene riservata per la lavorazione di materiali metallici.

Il vantaggio principale della tecnologia SLS/SLM riguarda la molteplicità di materiali che possono essere usati per la stampa. Potenzialmente qualsiasi materiale fornito sotto forma di polvere può essere utilizzato con il Selective Laser Sintering/Melting e gli oggetti finali hanno una resistenza comparabile a quella di prodotti ottenuti con i sistemi produttivi tradizionali. Tuttavia, gli stessi autori rilevano che questa situazione potenziale

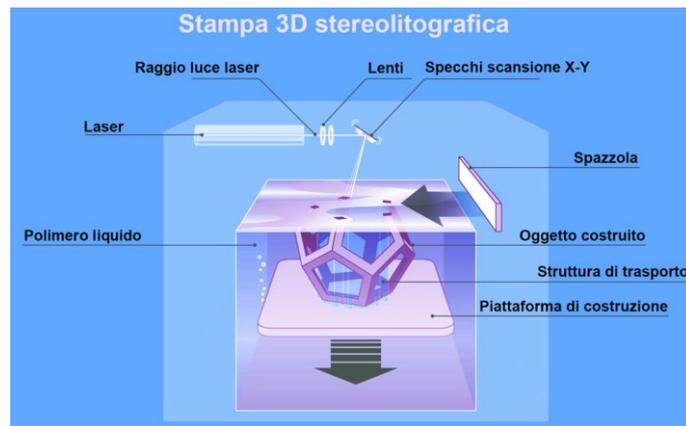
è ben lontana dal realizzarsi a causa delle differenze e delle incompatibilità tra i laser e i materiali, che potrebbero non essere utilizzabili o fusi ad una densità non ottimale per garantire elevate prestazioni.

Le prestazioni di stampanti a tecnologia SLS/SLM sono fortemente influenzate da alcuni fattori fondamentali che devono essere tenuti in grande considerazione nel momento della lavorazione. In particolare, la qualità dipende dallo spessore dello strato di polvere depositato, dal diametro del raggio laser utilizzato e dalla velocità dello scanner che fa funzionare il laser sulla base del modello 3D, nonché dalla temperatura di fusione che deve essere adatta al materiale utilizzato. Per quanto riguarda i materiali ceramici alcuni studi hanno dimostrato come l'aumento della resistenza meccanica del prodotto abbia un rapporto diretto con l'aumento della temperatura di fusione e inverso con il tempo di sinterizzazione. Per ottenere oggetti resistenti è quindi necessario che la temperatura generata dal laser sia più elevata possibile in modo da fondere il materiale in un lasso di tempo molto breve. Il processo di stampa avviene all'interno di una camera riscaldata riempita di gas inerte per evitare la combustione dei materiali plastici. Il riscaldamento della camera serve per pre-riscaldare la polvere e permettere così un raggiungimento più immediato della temperatura necessaria per la fusione. Nel caso delle polveri metalliche, il gas permette anche di evitare l'ossidazione che avverrebbe se il processo non fosse in atmosfera controllata.

Anche in questo caso, come nella tecnologia FDM e in tutte le altre tecnologie di stampa 3D, il processo di stampa avviene sulla base di un modello 3D precedentemente sviluppato. La macchina indirizza il raggio laser secondo le forme e le geometrie descritte nel modello e procede automaticamente alla stampa senza necessità di intervento umano.

#### 4.3.3 Stereolithography (SLA)

La tecnologia stereolitografica, brevettata negli anni Ottanta da Chuck Hull, poi fondatore di 3D Systems, permette di creare oggetti grazie alle proprietà di reazione fotochimica delle resine liquide utilizzate per la stampa. Pur mantenendo lo stesso concetto di base, riguardante la stampa strato su strato, la tecnologia SLA può avere due tipi di funzionamento. Il primo è simile a quelli delle altre tecnologie e consiste nell'immergere progressivamente la base di stampa nella resina liquida per permettere al laser di solidificare i vari strati del prodotto. Una volta creato il primo strato, la base viene abbassata della quantità sufficiente affinché l'oggetto sia ricoperto dalla resina liquida e il laser procede così alla stampa di un nuovo strato a contatto con il primo. Il secondo metodo prevede invece che il materiale liquido sia raccolto all'interno di una vaschetta di contenimento trasparente, che delimita lo spazio di lavoro della macchina, mentre il laser ultravioletto viene posizionato in basso e colpisce la resina verso l'alto, sfruttando la trasparenza del fondo della vaschetta. La resina si solidifica su una piattaforma posizionata nella vaschetta che viene successivamente sollevata per poter procedere alla creazione del secondo strato. In sostanza, mentre nel primo metodo il laser in alto crea gli strati spostando il pezzo verso il basso, nel secondo il processo avviene con un laser posizionato in basso che solidifica un oggetto che viene progressivamente alzato.



*Fig.4.3 Schema della stampante stereolitografica*

Al fine di ottenere prodotti di qualità elevata è importante la dimensione del laser, poiché minore è il diametro del raggio e maggiore è la precisione, così come la qualità dello stesso. Se il laser non è focalizzato ne risentirà la qualità del prodotto poiché la resina verrà ben solidificata dove il laser è focalizzato e sarà però contornata da una parte molle, meno solida, laddove il laser non riesce a solidificarla perfettamente. L'azienda ha collaborato con Texas Instruments per creare dei laser che rispondessero agli standard di precisione aziendali, a dimostrazione dell'estrema importanza di questa componente.

Questa tecnologia permette livelli di precisione fino a circa 0.05 millimetri, ma come già accennato la scelta di utilizzare la massima risoluzione o risoluzioni minori dipende dall'oggetto che deve essere creato e dalla sensibilità del materiale utilizzato. Alcune resine, date le loro caratteristiche chimico-fisiche, non possono essere stampate a risoluzioni molto elevate senza compromettere la qualità del prodotto.

#### 4.3.4 Multi-Jet Fusion (MJF)

La Multi Jet Fusion (MJF) è un nuovo processo di stampa 3D a base di polvere, grazie al quale vengono prodotti oggetti 3D con elevata precisione e risoluzione, porosità ridotta e superfici di alta qualità. Contrariamente alla sinterizzazione laser selettiva (SLS, Selective Laser Sintering), nella MJF non viene utilizzata alcuna radiazione laser. La stampa avviene mediante una testina di stampa Inkjet, che applica due diversi fluidi leganti sulla superficie del letto di polvere, visibile nella figura 4.4.

Come fonte di energia, nella MJF vengono utilizzate delle lampade a infrarossi, che illuminano continuamente la superficie di stampa. Le particelle di polvere da fondere vengono inumidite mediante la testina di stampa con un fluido che trasmette il calore (Fusion Agent). Le particelle assorbono il calore prodotto dalle lampade e si fondono le une con le altre oltre che con lo strato sottostante. Per evitare che le particelle di polvere si fondano le une con le altre al di fuori dell'area prevista, lungo il contorno del componente viene contemporaneamente applicato un fluido che inibisce il calore (Detailing Agent). In questo modo la superficie dell'oggetto 3D risulta uniforme e liscia.

## MULTI JET FUSION PROCESS:

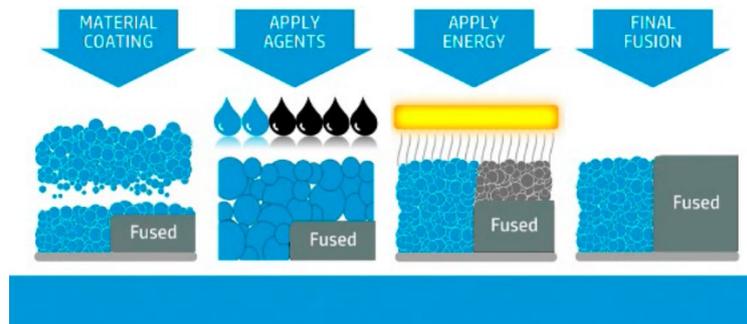


Fig. 4.4: schema Stampa MJF

I materiali utilizzati con questa nuova tecnologia sono le poliammidi che, come detto in precedenza, garantiscono buona resistenza all'umidità e al calore, rigidità e bassa porosità.

Il maggior punto di forza di questo processo è la possibilità di realizzare componenti funzionanti in tempi molto minori rispetto alle altre tecnologie AM. Per la produzione additiva questo probabile record di velocità di produzione costituisce un passo in avanti determinante, in quanto il tempo macchina rappresenta sempre uno dei fattori di prezzo più importanti in ambito produttivo.

Oltre alla velocità, la tecnologia di MJF garantisce anche un'ottima qualità pari o quasi a quelle dello stampaggio ad iniezione.

Per questo, questo nuovo tipo di processo costituisce un grande passo avanti nella manifattura additiva, garantendo qualità ed un abbassamento dei prezzi.

### 4.3.5 Materiali

La quantità di materiali utilizzabili nei processi di Additive Manufacturing è notevole, anche se sicuramente minore di quella per i processi tradizionali, ma è stato comunque necessario svolgere una selezione in base alle caratteristiche e le proprietà richieste.

#### 4.3.5.1 ABS

Con la sigla ABS viene identificata una famiglia di polimeri numerosa e versatile, che deve il suo successo anche alla facilità con cui si possono ottenere leghe e compound appositamente create per rispondere a delle esigenze specifiche. La sigla ABS deriva dalle iniziali dei tre monomeri che lo compongono: l'acrilonitrile, il butadiene e lo stirene. I blocchi di acrilonitrile forniscono rigidità, resistenza agli attacchi chimici, stabilità alle alte temperature e durezza. I blocchi di butadiene, che è un elastomero, forniscono tenacità a qualsiasi temperatura. Il blocco di stirene fornisce resistenza meccanica e rigidità.

L'ABS è comunemente utilizzato nella stampa 3D con deposito di filamento fuso (FDM). La temperatura alla quale fonde è tra i 220° e i 260°. Lo si può acquistare sottoforma di bobine di filamento di molteplici colori ma esiste anche in forma polvere per il procedimento di selective laser sintering.

#### 4.3.5.2 *NYLON (PA 12)*

Il PA 12 fa parte delle poliammidi, polimeri a catena lunga contenenti unità ammidi (N-H-C=O). Questi polimeri sono ottenuti tramite la polimerizzazione di un acido con un'ammide. Le principali caratteristiche delle poliammidi sono:

- la resistenza all'invecchiamento e alle alte temperature e nel tempo;
- l'elevata resistenza e rigidità;
- l'elevata fluidità, per un agevole riempimento degli stampi;
- eccellenti proprietà dielettriche;
- una buona resistenza all'abrasione;
- un'eccezionale resistenza chimica;

Nel settore dell'Additive Manufacturing, si trova in forma di filamento per FDM e sottoforma di polveri per SLS e MJF.

#### 4.3.5.3 *NYLON (PA 11)*

Come il PA 12, il PA 11 fa parte delle poliammidi, ma ha una flessibilità maggiore quindi una maggiore resistenza a rottura. La combinazione di ottima resistenza meccanica e buona flessibilità rende il PA11 un'ottima alternativa per applicazioni dove l'alta duttilità è importante.

Come il PA 12, per quanto riguarda l'additive manufacturing, si trova in forma di filamento per FDM e sottoforma di polveri per SLS e MJF.

#### 4.3.5.4 *Polipropilene*

È il materiale attualmente utilizzato per realizzare i componenti. Il polipropilene (PP) è uno dei materiali più utilizzati nel mondo delle materie plastiche. Secondo solo al Polietilene, questo materiale termoplastico semicristallino ha la particolarità di avere delle proprietà meccaniche differenti a seconda della tatticità chimica. Questo materiale è caratterizzato da un elevato carico a rottura, elevata duttilità, bassa densità, ottima resistenza termica e all'abrasione. Inoltre, presenta un basso costo rispetto alle sue proprietà tecniche elevate.

#### 4.3.5.5 *Altri materiali*

L'avanzare della tecnologia di additive manufacturing ha portato anche lo sviluppo di alcuni materiali apposti per questi nuovi processi. Ad esempio, sono state create delle resine, usate nei processi di stereolitografia, capaci di resistere ad alte temperature, al contrario di quelle più comuni, che le rende adatte alla realizzazione di prodotti finiti e funzionali.

Ad esempio, la resina Accura SL 5530, simile al policarbonato (trasparente), resiste all'acqua, all'umidità, ai solventi e alle alte temperature. Questo materiale ha un prezzo molto alto, per questo viene usato solitamente per prototipazione e test. È stato comunque confrontato per avere un confronto di un materiale adatto al nostro utilizzo e realizzabile con stereolitografia.

Materiale	PA 12	PA 11	PP NATURALE	SIMIL-PC Advanc High Temp	ABS
Processo	SLS	SLS	SLS	SLA	FDM
Max assorbimento dell'acqua, 20°C 50%	0.5 ± 0.2%	0.3 ± 0.2%	0.5 ± 0.2 %	0.55 ± 0.15%	
Modulo di elasticità (piano x-y)	2000 ± 200 MPa	1800 ± 200 MPa	750 ± 150 MPa	3,900 ± 400 MPa	
Modulo di elasticità (piano z)	1900 ± 200 MPa	1800 ± 200 MPa	750 ± 150 MPa	/	
Resistenza alla trazione (piano x-y)	50 ± 4 MPa	52 ± 4 MPa	18 ± 3 MPa	45 ± 10 MPa	41 Mpa
Resistenza alla trazione (piano z)	42 ± 5 MPa	49 ± 4 MPa	15 ± 3 MPa	/	
Allungamento a rottura (piano x-y)	11% ± 4%	30% ± 7%	20 ± 4 %	1.5 ± 1%	6%
Allungamento a rottura (piano z)	4% ± 2%	18 +/- 7%	9 ± 3 %	/	
Punto di rammollimento Vicat	163 °C	/	105 °C	/	
Heat deflection temperature @ 0,46 MPa	/	188 °C	/	170 – 250 °C	110°C
Heat deflection temperature @ 1.82 MPa	/	48 °C	/	110 – 120 °C	96°C
Densità allo stato solido (25° C)	0,93 g/cm <sup>3</sup>	0.99 g/cm <sup>3</sup>	0.90 ± 0.05 g/cm <sup>3</sup>	1.25 g/cm <sup>3</sup>	1,2 g/cm <sup>3</sup>
Resistenza Chimica	Buona				

Tab 4.1: Proprietà dei materiali

#### 4.3.6 Tolleranze

Un aspetto molto importante da considerare quando si vuole valutare l'avvio di una produzione per Additive Manufacturing sono le tolleranze che i vari processi sono in grado garantire. Le printing Farm con cui abbiamo svolto il confronto, danno diverse tolleranze a seconda del materiale e del processo scelto:

- Protolabs: SLS ±0,20 mm + 0,002 mm/mm  
SLA 0,05 ± 0,001 mm/mm  
MJF ± 0,30 mm + 0,002 mm/mm
- 3DHUBS: FDM ± 0.5% con un limite inferiore di ± 0.5 mm (± 0.020")  
SLA ± 0.5% con un limite inferiore di ± 0.15 mm (± 0.006")  
SLS ± 0.3% con un limite inferiore di ± 0.3 mm (± 0.012")  
MJF ± 0.3% con un limite inferiore di ± 0.3 mm (± 0.012")
- SD3D: Garantisce una tolleranza di 0,3 mm sul piano x-y e di 0,4 mm sull'asse z
- Craftcloud : NON SPECIFICATO
- Materialise: NON SPECIFICATO
- Xometry : +/-0.3% (min. 0.3 mm) per SLS e FDM

#### 4.3.7 Confronto materiali e tecnologie

Questo approfondimento delle tolleranze e dei materiali è stato fatto per riuscire a sviluppare correttamente i componenti. Come detto nella descrizione dei componenti iniziale, i pezzi devono essere fatti in modo che resistano al calore, all'umidità e al vapore. Nel caso del collettore, visto che i due pezzi devono essere uniti, devono essere fatti in modo che garantiscano una buona tenuta e quindi è necessario un grado di precisione che non tutte le tecnologie AM hanno. Infatti, abbiamo realizzato che per il componente collettore la precisione della tecnologia FDM, confrontata con i materiali ABS e PA 12, è scarsa e potrebbe non garantire la corretta realizzazione del pezzo dato che alcune parti sono troppo piccole. Mentre per quanto riguarda le altre tecnologie non dovrebbe sorgere alcun problema. La stereolitografia garantisce sicuramente la corretta realizzazione dei componenti, visto che è la tecnologia AM che assicura la precisione maggiore, ma per avere un materiale che risulti adatto alle alte temperature, al vapore e all'umidità bisogna ricorrere, oltre che ad un materiale molto costoso come la resina descritta in precedenza, anche ad un processo di post-produzione che è la polimerizzazione. Questa tecnologia risulta quindi non adatta al nostro confronto con lo stampaggio ad iniezione, ma un suo utilizzo per effettuare test, visto anche alla trasparenza del materiale, potrebbe risultare interessante per studiare il flusso dei liquidi all'interno della macchina.

La tecnologia SLS con i materiali PA 12, PA 11, il polipropilene e l'ABS garantisce buona precisione, necessaria per la realizzazione dei componenti e i materiali sono in grado di garantire resistenza alle alte temperature e all'umidità. La Multijet Fusion, che lavora principalmente PA 12, garantisce tolleranze e proprietà dei materiali molto simili alla tecnologia SLS.

## 4.4 Progettazione in ottica di processi di Additive Manufacturing

### 4.4.1 Introduzione

Dal momento che l'additive manufacturing permette di realizzare più facilmente geometrie complesse, può risultare conveniente progettare componenti di complessità maggiore. Questi sono in grado di svolgere lo stesso compito normalmente affidato ad un assieme di più elementi e permettono di ottenere una maggiore robustezza del prodotto unita ad un risparmio sui costi di assemblaggio. Progettando per l'additive manufacturing si cercherà di sfruttare opportunamente questa possibilità, con l'obiettivo di raggiungere una funzionalità del prodotto che sia la migliore possibile, a fronte di un numero minore di materiale e parti impiegate.

Una complessità delle geometrie più facilmente gestibile in fase di produzione e una progettazione rivolta a più materiali e tecnologie, permettono di ottenere una sofisticazione del prodotto adattabile a diverse situazioni di utilizzo. Un prodotto può ricevere nuove funzionalità sia da una modifica migliorativa delle forme sia da un upgrade del processo produttivo; ed entrambe queste possibilità, a condizione di avere accesso ai macchinari necessari, risultano a costo zero. I soli costi da affrontare riguardano i tempi di ricerca e di sviluppo delle nuove soluzioni. Non risultano necessarie né una riorganizzazione delle linee produttive né un rifacimento delle attrezzature. I macchinari sono per loro natura riconfigurabili a piacimento e hanno solamente bisogno di una riprogrammazione software. Ciò significa che una qualsiasi modifica del prodotto implica la sola preparazione di un file 3D, successivamente tradotto in una nuova sequenza di lavoro.

Queste potenzialità dell'additive manufacturing hanno portato ad un nuovo modo di progettare le parti, che si suddivide principalmente in:

### 4.4.2 Ottimizzazione topologica

L'ottimizzazione topologica è un tipo di tecnica di ottimizzazione strutturale che, attraverso una simulazione al computer, è possibile far convergere le caratteristiche essenziali del progetto in termini di volume di progetto, carichi, condizioni di funzionamento e obiettivi da raggiungere, permettendo di sintetizzare una forma innovativa per il prodotto, identificando quelle zone del volume necessarie al raggiungimento del target, e rimuovendo tutte le altre. Rispetto ad altre tecniche di ottimizzazione strutturali tipiche, come l'ottimizzazione dimensionale o ottimizzazione di forma, l'ottimizzazione topologica può aggiornare sia la forma che la topologia di una parte. Tuttavia, le forme complesse ottenute dall'ottimizzazione topologica non sono adatte per i processi di produzione tradizionali come la lavorazione CNC, per questo motivo questa tecnica è stata ottimizzata e utilizzata solo con l'avvento dei processi produttivi additivi.

### 4.4.3 Disegno della struttura multi-scala

Visto le capacità uniche di processi AM, possono essere realizzati parti con complessità multi-scala. Questo fornisce una grande libertà di progettazione per i progettisti utilizzando strutture cellulari o strutture reticolari su micro-scala per ottenere le proprietà desiderate. Ad esempio, nel campo aerospaziale, strutture reticolari fabbricati mediante processo AM possono essere utilizzati per la riduzione del peso. Nel campo bio-medico, un impianto fatto di strutture a traliccio o cellulari può migliorare l'osteointegrazione (l'unione tra l'impianto artificiale e l'osso).

#### 4.4.4 Consolidamento parti

A causa dei vincoli di metodi di produzione tradizionali, alcuni componenti complessi sono distinti in più parti per la facilità di produzione così come per l'assemblaggio. Questa situazione è stata cambiata con l'utilizzo di tecnologie AM. In alcuni casi più parti possono essere consolidate in un'unica parte complessa fabbricata da processi produttivi additivi. Questo processo riprogettazione può essere chiamato come consolidamento parti. Inoltre, la ricerca mostra che parti consolidate non solo riducono il numero di componenti, ma può anche migliorare le prestazioni funzionali del prodotto.

#### 4.4.5 Riprogettazione dei componenti della Nuova Simonelli

Analizzando i componenti affidati dall'azienda e aver studiato le tecniche precedentemente descritte abbiamo provato a riprogettare i componenti dell'azienda.

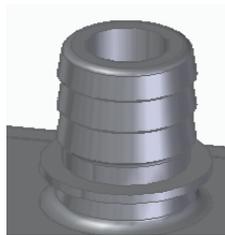
##### 4.4.5.1 Copriresistenza

Per il copriresistenza non è possibile applicare nessuna di queste tecniche, in quanto è un particolare abbastanza semplice: non è possibile rimuovere materiale con l'ottimizzazione topologica, unire parti o migliorare la sua funzionalità. Già in base a questo, si può dire che la convenienza a realizzare il pezzo con sistemi AM potrà essere molto limitata, in quanto non si sono potute sviluppare le funzionalità e quindi i vantaggi che queste tecnologie offrono. Visto ciò, il componente non è stato neanche provato a realizzare dall'azienda con la loro stampante 3d.

##### 4.4.5.2 Collettore

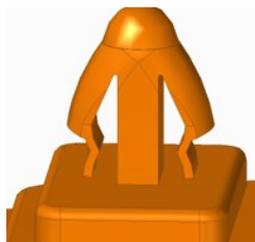
Per le due parti del collettore si è inizialmente pensato di unirle e questo avrebbe dato un grosso vantaggio, ma l'azienda ci ha successivamente comunicato che le due parti dovevano essere smontabili per poter controllare il suo interno durante la manutenzione periodica che avviene sulla macchina. Quindi l'unica cosa che è stata possibile fare è provare a velocizzare il montaggio.

Per il collettore superiore abbiamo rimodellato il profilo superiore per favorire l'inserimento dei tubi.



*Fig 4.5: Profilo superiore*

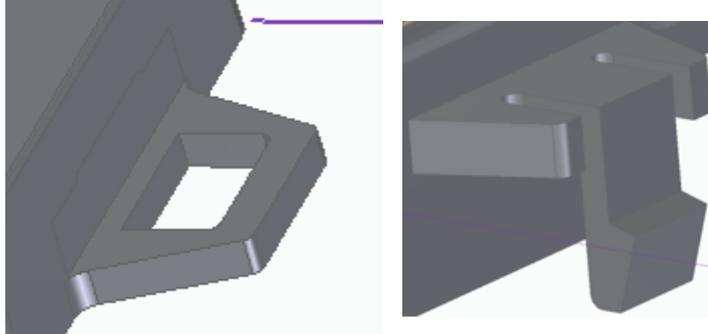
Per il collettore inferiore viene sfruttato il precedentemente foro utilizzato dalla vite per agganciare il collettore con una clip.



*Fig 4.6: Clip d'aggancio al telaio*

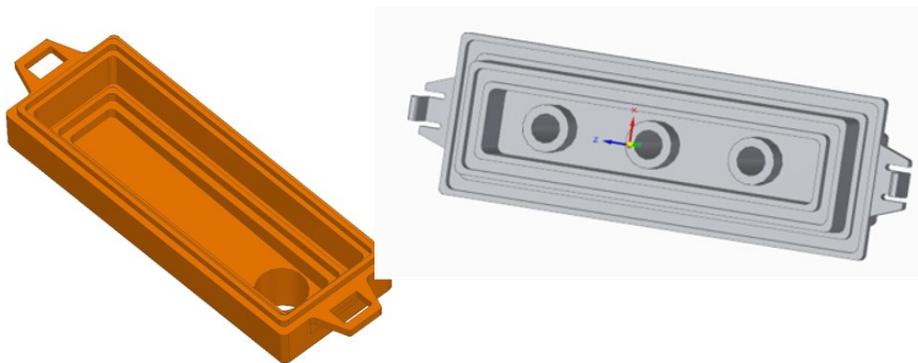
Per le due parti del collettore abbiamo:

- eliminato il precedente collegamento con la vite autofilettante inserendo una clip di montaggio ad incastro, il profilo dalla clip fa in modo che vada a flettersi per poi esercitare una forza sul gancio inferiore mediante un profilo a “nasello”.



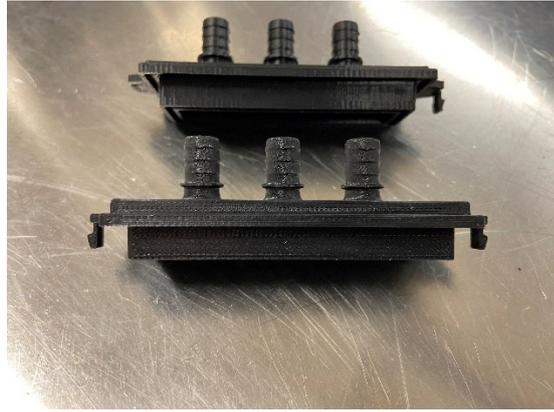
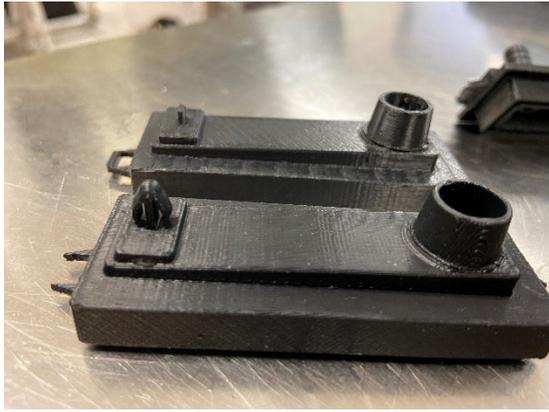
*Fig 4.7 e 4.8: clip di montaggio a incastro nel collettore inferiore (a sinistra) e superiore (a destra)*

- maggiorato gli ingombri per inserire una tenuta a labirinto per non far trasudare acqua dal componente e per la parte del collettore inferiore fare intercettare la clip col foro del telaio



*Fig. 4.9 e 4.10: Tenuta a labirinto degli ingombri nel collettore inferiore (a sinistra) e nel collettore superiore (a destra)*

L'azienda ha realizzato il componente collettore con la sua stampante FDM Stratasys, riscontrando però non pochi problemi nella corretta riuscita nella stampa. Infatti, come si vede dalle immagini sottostanti, lo spessore dell'aggancio del collettore inferiore e il perno della clip d'aggancio al telaio hanno una sezione troppo piccola per essere realizzata correttamente con una stampante FDM. Inoltre, nella parte inferiore del collettore inferiore in cui viene scaricata l'acqua dovrebbe esserci una “corona” che impedisce all'acqua di risalire e insediarsi nel telaio della macchina, la quale però, non è stata stampata perché troppo piccola rispetto al grado di risoluzione della stampante.



*Fig 4.11 e 4.12: Realizzazione delle due parti del collettore da parte dell'azienda*

## 4.5 Analisi economica attraverso siti web di produttori

Per avere dei preventivi dei pezzi assegnati dall'azienda, per la produzione in Additive Manufacturing, ci siamo affidati a delle printing farm, ovvero delle piattaforme online che, una volta caricato il file CAD, danno una stima dei prezzi in base al tipo di processo e al materiale, in maniera automatica o attraverso l'assistenza di un operatore. La maggior parte ha un'ampia gamma di materiali per la produzione, in base al tipo di processo.

Ecco l'elenco dei siti utilizzati:

- 3DHUBS
- PROTOLABS
- Xometry Europe
- Craftcloud
- Materialise
- SD3D

Come si può osservare nella figura sottostante, le piattaforme permettono di avere dei preventivi in base al lotto, al materiale, alla rifinitura e alla risoluzione. In qualche caso, permette di scegliere l'orientamento.

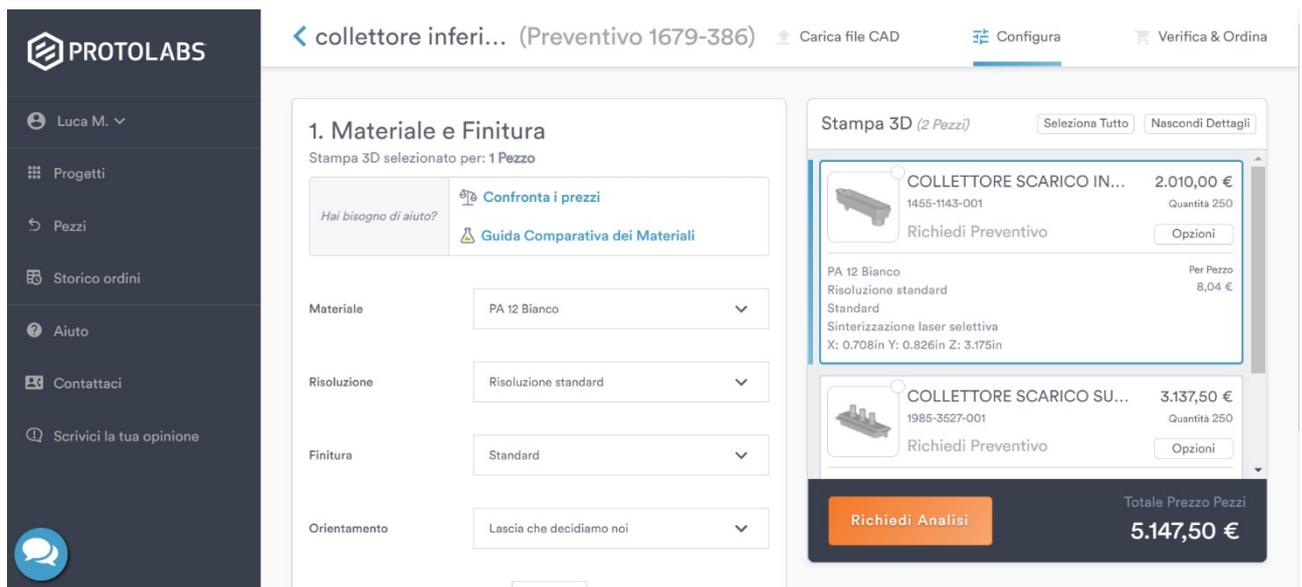


Fig 4.13: Facciata del sito Protolabs

### 4.5.1 I Siti web

#### 4.5.1.1 3DHUBS

3D Hubs è una piattaforma online che mette in condivisione un network di stampanti 3D. Collega chi già è in possesso di una stampante con chi ne ha bisogno. Una sorta di Airbnb della stampa 3D. Il funzionamento è molto semplice: chi ha bisogno di stampare un file 3D visita il sito, sceglie uno degli Hub registrati e invia il file. Quando l'oggetto è pronto, è possibile ritirarlo in loco oppure riceverlo a domicilio. Tutti coloro che sono in possesso di una stampante possono registrarsi e iniziare ad offrire un servizio. In questo senso, 3D Hubs offre l'opportunità di inserirsi in un mercato già affollato dal punto di vista globale - molti sono infatti i service di stampa 3D online più "blasonati" - ma non ancora ampiamente esplorato nella sua dimensione locale.

#### 4.5.1.2 *Protolabs*

Protolabs è un'azienda che permette la prototipazione rapida e la produzione di piccoli volumi, stampate in AM, lavorate a CNC o stampate ad iniezione. È nata e ha sede in Minnesota, USA ma ha stabilimenti di produzione anche in Germania, Inghilterra, Giappone.

#### 4.5.1.3 *Xometry Europe*

Xometry Europe è la più grande rete europea di lavorazione CNC e stampa 3D con più di 2000 Partner in Europa, più di 4000 nel Mondo. Permette la produzione, oltre con CNC e AM, anche con stampaggio ad iniezione e lavorazione di lamiera.

#### 4.5.1.4 *Craftcloud*

Craftcloud è la piattaforma di confronto costi e stampa 3D dell'azienda All3DP, fondata nel 2014. Offre un servizio di stampa 3d in tutto il mondo con molteplici materiali.

#### 4.5.1.5 *Materialise*

Materialise è una delle prime aziende nate per offrire un servizio di additive manufacturing. È stata fondata nel 1990 e ha sede centrale in Belgio, ma offre i suoi servizi in tutto il mondo. Oltre ad offrire un servizio di stampa 3d, si occupa anche di software per ottimizzare i processi di Additive.

#### 4.5.1.6 *SD3D*

È un'azienda americana che offre un servizio di stampa 3d, sia per la prototipazione sia per la produzione in serie. In questo caso non sarebbe possibile fare affidamento per un eventuale acquisto in quanto l'azienda ha sede e spedisce solamente negli Stati Uniti.

Il confronto tra le varie piattaforme è stato fatto variando le varie tipologie di processo e i materiali che sono più adatti al nostro caso.

#### 4.5.2 Risultati delle valutazioni economiche

Per prima cosa, in questi siti, sono stati fatti dei preventivi per lotti da mille pezzi per tutti i particolari, variando tipo di processo e materiale tra quelli selezionati precedentemente. Oltre i mille pezzi molte piattaforme non riuscivano a dare un prezzo, però se si fosse veramente interessati ad acquistare avrebbero fatto un preventivo tramite un operatore.

COPRIRESISTENZA				lotto: 1000 pezzi			
materiale	PA 12	PA 12	ABS	PC-like	PP	PA 11	PA 12
processo	SLS	FDM	FDM	SLA	SLS	SLS	MJF
SD3D	22.372 €		10.197 €				100.510 €
3DHUBS	16.730 €	10.380 €	5.430 €	37.230 €			18.060 €
PROTOLABS	25.965 €			62.992 €	26.760 €	29.182 €	17.960 €
CraftCloud	6.722 €		2.909 €		17.948 €		
prototek	7.736 €						7.760,00 €
xometry	22.300 €	94.210 €	34.210 €	29.907 €		30.960 €	24.211 €
materialise	34.860 €					41.830 €	

collettore superiore		riprogettato		lotto: 1000 pezzi			
materiale	PA 12	PA 12	ABS	PC-like	PP	PA 11	PA 12
processo	SLS	FDM	FDM	SLA	SLS	SLS	MJF
SD3D	8.156 €		4.533 €				35.337 €
3DHUBS	5.340 €	3.930 €	2.190 €				5.640 €
PROTOLABS	10.119 €			33.512 €	10.404 €	11.223 €	7.687 €
CraftCloud	3.219 €		1.401 €		17.874 €		
prototek							3.710 €
xometry	10.770 €	23.440 €	8.435 €	18.950 €		14.634 €	5.880 €
materialise	6.950 €					8.380 €	

collettore inferiore riprogettato				lotto: 1000 pezzi			
materiale	PA 12	PA 12	ABS	PC-like	PP	PA 11	PA 12
processo	SLS	FDM	FDM	SLA	SLS	SLS	MJF
SD3D	5.879 €		2.468 €				25.734 €
3DHUBS	4.180 €	3.230 €	1.850 €				4.080 €
PROTOLABS	8.137 €			31.577 €	8.540 €	9.240 €	6.247 €
CraftCloud	2.044 €		990 €		17.835 €		
prototek							2.570 €
xometry	9.580 €	20.430 €	7.350 €	14.470 €		13.130 €	3.657 €
materialise	6.070 €					9.476 €	

Tab.4.2: prezzi dei componenti per lotti da 1000 pezzi

Dalla prima parte di questa tabella si può vedere come i costi per la produzione in additive manufacturing del copriresistenza siano molto alti. Ad esempio, per quanto riguarda la tecnologia SLS in PA 12, viene una media tra i siti di circa 20 € al pezzo; in alcuni casi non è stato nemmeno possibile fare un preventivo poiché il costo era eccessivo. L'unica soluzione che sembra competitiva sono i costi in ABS per FDM nei siti 3DHUBS e CraftCloud. Per il resto il costo non scende sotto i 10 € al pezzo.

Da questa prima verifica abbiamo realizzato che la produzione con FDM in ABS è la soluzione con costi minori nella maggior parte dei siti, tranne sul sito Materialise in cui per i componenti del collettore si arriva ad

un costo di 60 € al pezzo. Questa tecnologia potrebbe però, nel nostro caso, non avere il grado di precisione necessario per realizzare i nostri componenti.

In alcuni casi, come per l'ABS con FDM in Materialise e il MJF in SD3D i costi sono nettamente più alti rispetto agli stessi del sito e degli stessi materiali in altri siti. Per questo non vengono considerati nella nostra analisi.

Le soluzioni migliori ci sono sembrate, da questo primo confronto, le tecnologie SLS e MJF utilizzando come materiale il PA 12. Per quanto riguarda il PA 11 e il PP in SLS non abbiamo potuto verificare il prezzo in quanto disponibili solo in uno o poco più siti. Il PA 12 SLS è praticamente presente in tutte le piattaforme tranne su Prototek che produce soltanto con MJF. Bisogna dire che per tutte le tecnologie c'è un discostamento abbastanza ampio tra i preventivi, ad esempio per il collettore inferiore in PA 12 in SLS si passa dai 2300 € di CraftCloud ai 9853 € di Xometry. Non sappiamo bene da cosa derivi in questa differenza, ma possiamo ipotizzare il minor costo della manodopera, in quanto CraftCloud ha stabilimenti in Cina, mentre Xometry lavora in Germania.

Il sito che unisce bassi costi e affidabilità, almeno dai dati, sempre essere 3DHUBS, in cui in seguito utilizzeremo anche per vedere come variano i prezzi al variare dei lotti.

Come già avevamo constatato la Stereolitografia ha un costo veramente alto e non adatto al confronto con la produzione in serie.

Il sito che sembra avere costi più bassi è CraftCloud, soprattutto con PA 12 in SLS e ABS in FDM, però il sito non specifica le tolleranze e questo non ci rassicura su una corretta realizzazione del pezzo.

Per avere un confronto dei prezzi più preciso coi i costi abbiamo preventivato le tecnologie con i materiali principali variando la grandezza dei lotti. Da qui in poi il confronto è stato fatto soltanto per quest'ultimo, visto che per il copri-resistenza si è realizzato che, oltre a non poterlo riprogettare, i costi per additive manufacturing sono sensibilmente più alti e non convenienti.

### 4.5.3 Costi unitari per il collettore

La tabella sottostante contiene i costi ottenuti dai vari siti variando il numero di pezzi richiesti per 1,10,100,1000. I preventivi sono stati fatti solamente per i materiali che, a parità delle proprietà meccaniche, risultano convenienti o è disponibili ottenere un preventivo in più siti. Ad esempio, per quanto riguarda il PA 11, non è stato fatto questo confronto, in quanto, ha proprietà molto simili al PA 12, ha un costo lievemente maggiore e pochi siti, tra quelli usati, permette di ottenerne un preventivo. Mentre per la resina Accura SL5530 è stato fatto perché, anche se non risulta sicuramente conveniente, è l'unico materiale lavorabile per stereolitografia adatto al nostro componente. In rosso sono segnati i valori che risultano molto differenti da quelli ottenuti dagli altri siti con stessa tecnologia e stesso materiale.

Quantità	3DHUBS					SD3D		
	PA 12 SLS	PA 12 FDM	ABS FDM	PA 12 MJF	PC SLA	ABS FDM	PA 12 MJF	PA 12 SLS
1	33,07 €	63,40 €	41,56 €	34,30 €	97,94 €	68,00 €	144,22 €	85,37 €
10	15,93 €	21,08 €	13,28 €	16,88 €	41,47 €	14,98 €	101,85 €	30,28 €
100	10,46 €	10,73 €	6,15 €	10,56 €	28,03 €	6,47 €	70,55 €	17,99 €
1000	9,21 €	6,74 €	3,75 €	9,80 €	19,45 €	5,34 €	61,97 €	14,08 €

Quantità	Protolabs			Craftcloud			prototek
	PA 12 SLS	PC SLA	PA 12 MJF	PA 12 SLS	PA 12 MJF	ABS FDM	PA 12 MJF
1	153,07 €	254,06 €	69,84 €	28,84 €	38,38 €	19,72 €	16,00 €
10	31,60 €	88,31 €	23,72 €	13,03 €	11,79 €	3,31 €	10,53 €
100	19,46 €	62,91 €	15,98 €	10,02 €	8,25 €	2,57 €	9,48 €
1000	18,26 €	60,31 €	13,93 €	9,09 €	7,49 €	1,67 €	9,48 €

Quantità	Materialise			Xometry			
	PA 12 SLS	PA 12 MJF	ABS FDM	PA 12 SLS	PA 12 MJF	ABS FDM	PC SLA
1	26,52 €	26,26 €	266,63 €	22,24 €	23,22 €	15,83 €	130,39 €
10	16,80 €	14,72 €	180,18 €	20,63 €	17,58 €	15,82 €	56,65 €
100	14,94 €	12,60 €		20,35 €	11,34 €	15,79 €	36,12 €
1000	13,90 €	11,42 €		20,35 €	9,36 €	15,79 €	36,12 €

Tab 4.3: Costi unitari al variare del lotto ottenuti dai siti dei produttori

A differenza dello stampaggio ad iniezione la linea dei costi unitari delle tecnologie AM rispetto alla grandezza del lotto raggiunge un asintoto orizzontale molto presto, già dopo i 100 pezzi il costo per pezzo varia di poco per la maggior parte delle tecnologie. Come vedremo dopo, nell'analisi dei modelli di costo, per tecnologie come SLS e MJF è importante riuscire a riempire la camera di stampa, dopodiché il costo unitario non avrà ulteriori variazioni.

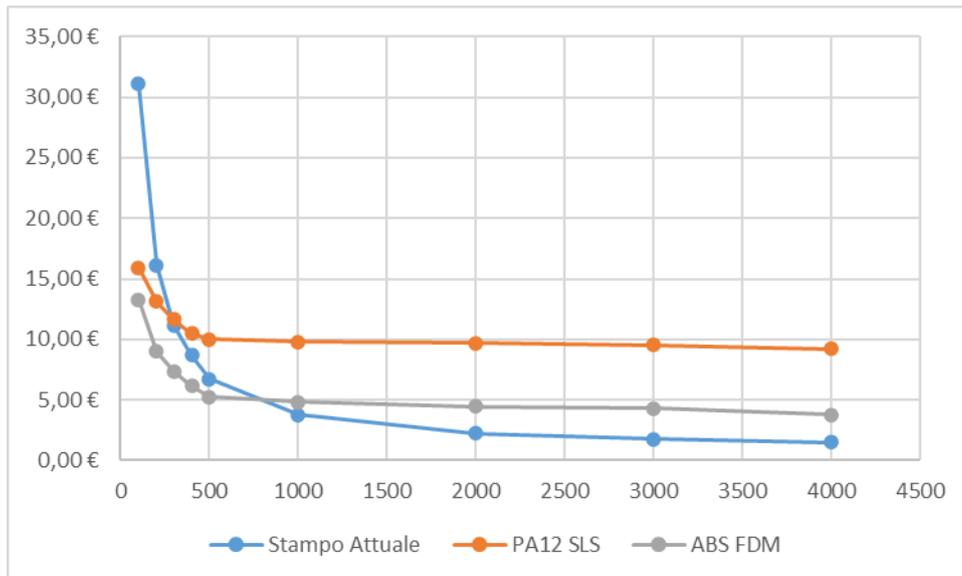


Fig 4.14: Grafico dell'andamento dei prezzi per 3DHUBS per FDM ABS e SLS PA 12 c i costi attuali della Nuova Simonelli

Ad esempio, in questo grafico vediamo il confronto dei costi ottenuti da 3DHUBS per FDM e SLS con lo stampaggio ad iniezione utilizzando i costi attuali della Nuova Simonelli. Si può notare come in questo caso lo stampaggio ad iniezione è sicuramente conveniente già sotto i mille pezzi per ABS FDM e addirittura sotto i 400 per SLS.

Utilizzando però i costi ottenuti da Leancost, ipotizzando la necessità di uno stampo completamente nuovo, le cose si differenziano:

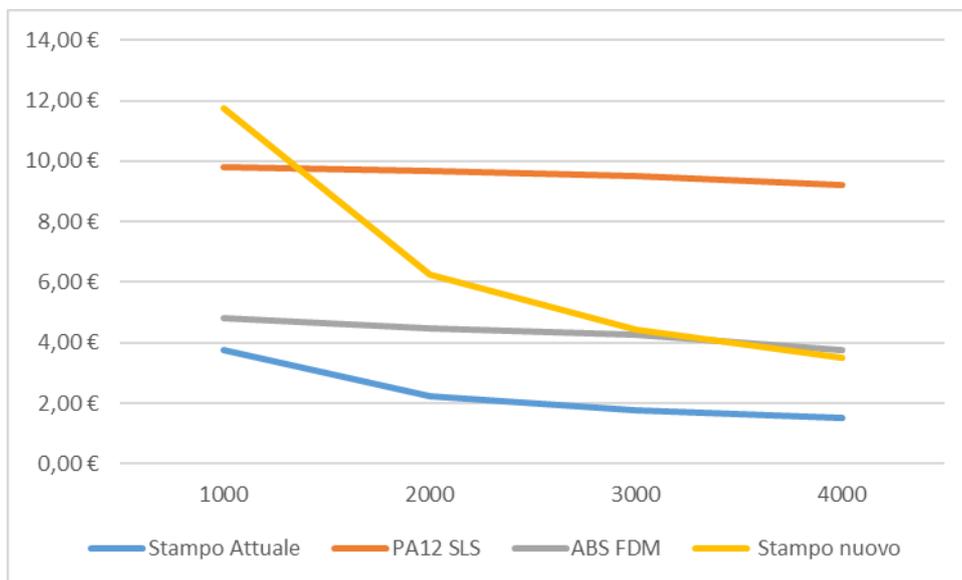


Fig 4.15: grafico dei costi ottenuti da LeanCOST e dal sito 3DHUBS

Infatti, la tecnologia SLS risulta conveniente fino a sopra i mille pezzi, mentre l'FDM arriva sopra ai 3000, non garantendo però, come già detto la corretta realizzazione dei pezzi.

## 4.6 Modelli di costo

Per avere ben chiaro dove avvenissero i costi per quanto riguarda la produzione in AM abbiamo cercato di fare un'analisi dei processi il più precisa possibile, suddividendoli nelle varie fasi della produzione, esaminando le caratteristiche e le differenze tra le varie tecnologie.

Il modello di costo generico per la manifattura additiva considera le fasi generali in modo non specifico del processo. La formulazione dei costi è suddivisa in tre fasi della lavorazione:

- Pre-build
- Build
- Post-processing

I costi connessi a ciascuna di queste fasi, rispettivamente,  $C_{pre}$ ,  $C_{build}$ ,  $C_{pos}$ , vengono sommati per ottenere il Costo Totale,  $C_{tot}$ . Ogni fase di lavorazione viene considerata indipendente dalle altre.

### 4.6.1 Modello di costo per Fusion Deposition Modeling

#### 4.6.1.1 Costo del materiale

La quantità del materiale utilizzato dipende da:

- il volume del pezzo
- la percentuale di riempimento (infill)
- il volume dei supporti (se necessari) e il rapporto di riempimento

Per avere una stima del volume del materiale utilizzato, sia per il pezzo che per i supporti, abbiamo utilizzato Ultimaker Cura, un software che simula il processo di stampa (fig. 4.17).

Per i supporti è sufficiente una percentuale di riempimento minore di quello del pezzo, visto che poi dovrà essere rimosso. Conoscendo la densità e il prezzo al kg, si può calcolare quanto mi costa il pezzo per il materiale.

#### 4.6.1.2 Costo della macchina

Una parte rilevante dell'investimento necessario per la produzione in AD riguarda la stampante. Per quanto riguarda il nostro caso prendiamo la stampante Ultimaker S5 Pro, con un costo approssimato di 20.000 €. Questo costo va ammortato in 5 anni, considerando che è un settore con una tecnologia che si sviluppa di anno in anno e la macchina perde il suo valore abbastanza velocemente. Vengono aggiunte una somma annua pari al 5% del prezzo della macchina per il costo delle infrastrutture e un altro 5% per la manutenzione della macchina. Le ore di utilizzo della macchina dipendono dal tipo di utilizzo che ne facciamo: se la utilizziamo per la produzione di lotti medi, il load factor arriverà al 75% delle ore in un anno, se lo usiamo per prototipazione rapida questo coefficiente si abbassa. Dividendo le spese totali annue della macchina per le ore disponibili otteniamo il COSTO ORARIO, a cui sommiamo la spesa per l'energia elettrica.

#### 4.6.1.3 Fasi di stampa

##### 4.6.1.3.1 Pre-build cost

La fase di Pre-build considera tutto il lavoro di preparazione necessario prima di produrre una parte. Si considera, però, che il file Cad del particolare sia già stato sia già stato prodotto senza errori e compatibile con un software adatto al LM. Supponendo che un operatore, pagato  $C_{oper1}$  per tempo unitario, esegua tutte le attività in questa fase, dovrà trascorrere del tempo,  $T_{pos}$ , scalando e posizionando il particolare. Dovrà poi

impostare i parametri del processo (come lo spessore del layer, tipo del materiale, ecc.) nel software LM impiegando  $T_{param}$ . Altro tempo dovrà essere speso per generare le strutture di supporto,  $T_{supp}$ , e nello Slicing del particolare,  $T_{slice}$ . In caso siano necessarie più stampe del pezzo, questa parte viene considerata solo una volta. Nel pre-build si aggiunge la fase Setup, dove una volta che il prezzo è pronto, verrà preparata la macchina per iniziare la costruzione: viene impostata la temperatura dell'ugello e del piatto di stampa e le bobine di materiale viene caricato, si imposta l'altezza dell'asse z, azzerato il posizionamento x-y, viene eseguita la diagnostica e livellata la piattaforma di costruzione, spendendo un tempo totale  $T_{setup}$ .

Quindi, il costo totale di questa fase di pre-build è:

$$C_{pre} = (T_{pos} + T_{param} + T_{supp} + T_{slice} +) * C_{oper1} + T_{setup} * C_{oper1}$$

#### 4.6.1.3.2 Build cost

Dopo la preparazione, il particolare è inviato alla macchina per essere prodotto. Build cost è definito come il prodotto tra il tempo di costruzione e il prezzo per tempo speso dalla macchina più i costi di supervisione di un operatore. I costi di esercizio della macchina, come già detto prima, includono l'ammortamento della macchina, il consumo di energia e la supervisione dell'operatore se necessaria. Il tempo di costruzione  $T_{build}$  può essere suddiviso in tempo di produzione,  $T_{stamp}$ , e tempi inattivi,  $T_{idle}$ .  $T_{man}$  è quando vengono prodotti i supporti e la parte, mentre  $T_{idle}$  si riferisce ai tempi, in un certo senso, persi, come il tempo di warm-up e i tempi di raffreddamento. Per quanto riguarda la supervisione un operatore può controllare più macchina contemporaneamente o comunque eseguire altri lavori; per questo moltiplichiamo il suo costo per un coefficiente  $k$  pari a 0,1.

Il tempo di produzione dipende fortemente dalle dimensioni, dalla forma e dall'orientamento. Riducendo al minimo il volume di supporto, meno materiale viene depositato in modo che  $T_{stamp}$  sia più piccolo. Riducendo al minimo l'altezza, il numero di strati viene diminuito, ma tende ad aumentare l'area media della sezione trasversale di ogni sezione, diminuendo generalmente comunque il tempo di inattività e il tempo totale di costruzione e di conseguenza i costi.

Quindi la formula per il costo della fase di costruzione è:  $C_{build} = (C_{oper1} * k + C_{macc}) T_{build}$

#### 4.6.1.3.3 Post-processing cost

Il costo della fase di post-processo,  $C_{post}$  dipende dal tempo per rimuovere i supporti  $T_{rem}$  e per rifinire la superficie del modello  $T_{fin}$  per ottenere la qualità della superficie desiderata. Queste operazioni avvengono manualmente, pertanto il costo di questa fase viene calcolato moltiplicando il tempo di queste due ultime operazioni per il costo dell'operatore  $C_{oper2}$ . Non potendo calcolare in alcun modo questi tempi sono stati stimati, per questo potrebbero risultare non precisi.

#### 4.6.1.3.4 Costo totale

Il costo totale per realizzare un singolo pezzo è la somma dei costi dei tre processi più il costo del materiale necessario:  $C_{tot} = C_{pre} + C_{build} + C_{post} + C_{mat}$

materiale	ABS	
costo	45	€/kg
Densità	1,1	g/cm

Costo operatore 1	30	€/h
Costo operatore 2	20	€/h

Nome Macchina	Ultimaker S5 Pro
Costo acquisto stampante	10000,00 €
Costo infrastrutture all'anno	500,00 €
Costo Manutenzione annuale	500,00 €
periodo ammortamento	5 anni
tasso di attualizzazione	0,1
costo di ammortamento	2.637,97 €
ore impiego macchina	4380 h
load factor	50%
costo energia	0,06 €/KWh
potenza	0,22 KWh
costo orario macchina	0,84 € €/h

Nome pezzo	Collettore superiore	
Volume pezzo	9,27	cm <sup>3</sup>
Volume supporti	10,1	cm <sup>3</sup>
rapporto riempimento supporti	0,3	
peso totale	13,5	g
costo materiale	0,61	€

PRE-BUILD		
preparazione prima stampa	0,5	h
Costo prep. prima stampa	15,00	€
tempo per build-setup(op,macch)	0,1	h
Costo setup	3,08	€
Costo pre-build	18,08	€

BUILD		
tempo warm-up	0,1	h
tempo di stampa	1,80	h
tempo raffreddamento	0,1	h
tempo build	2,00	h
costo supervisione	6,00	€
Costo del processo di stampa	7,69	€

POST PROCESS		
tempo rimozione supporti	0,1	h
tempo rifinitura	0,1	h
tempo tot post-process	0,2	h
Costo Post-process	4,00	€

Costo Totale	30,38	€
--------------	-------	---

Fig 4.16: Modello di costo applicato al collettore superiore

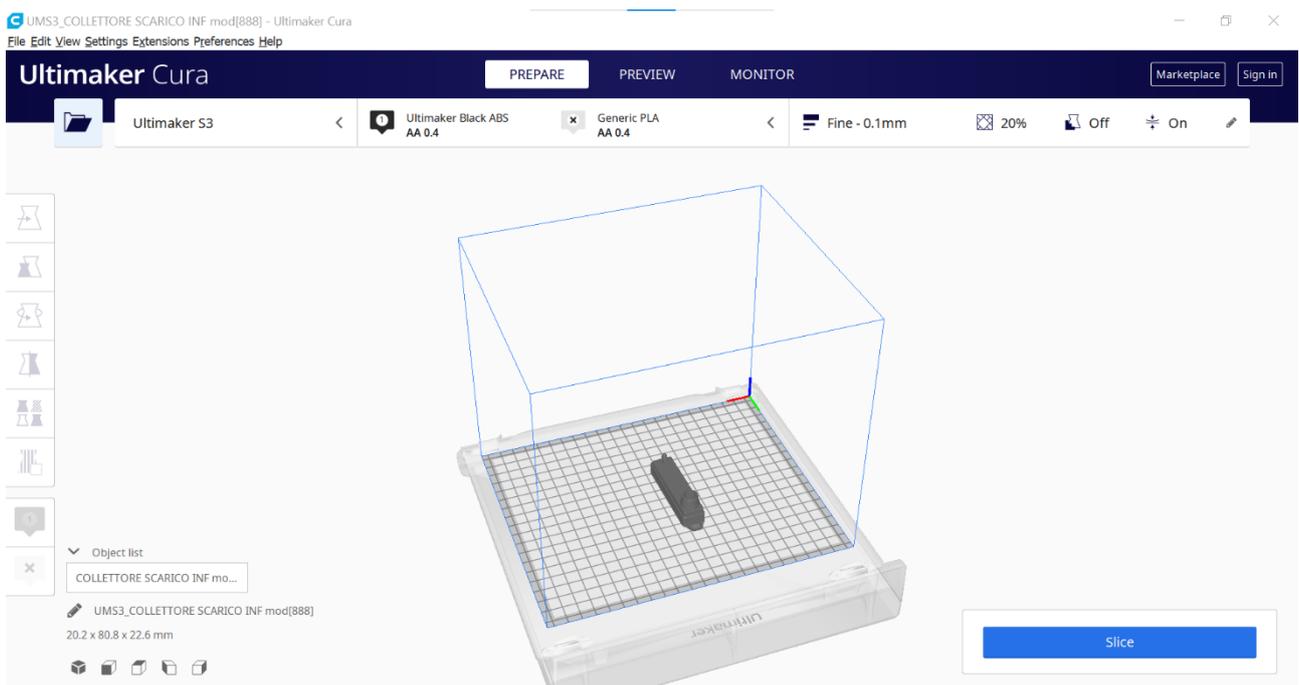


Fig.4.17: Simulazione della stampa con Ultimaker Cura

#### 4.6.1.4 Costi e produzione di più componenti

Come per i costi dei siti, è stato variato il numero di pezzi prodotti per vedere come varia il prezzo unitario in base al modello di costo.

Innanzitutto, bisogna vedere quanti pezzi si possono stampare in una singola stampa. Per farlo, abbiamo usato ancora una volta la simulazione su Cura, cercando di riempire il piatto. Per la stampante scelta, Ultimaker S5 pro, se ne possono stampare massimo 20. Da qui possiamo vedere quante stampe servono per lotto. Ad esempio, per un lotto di 100 pezzi saranno necessarie cinque stampe. Ora vediamo come variano i costi:

##### 4.6.1.4.1 Costo del materiale

Il costo del materiale per pezzo rimane sempre uguale, non dipende dal numero di pezzi stampati.

##### 4.6.1.4.2 Costo pre-build

La preparazione della prima stampa è necessaria una sola volta per lotto, mentre il setup (inserimento dei parametri e caricamento del materiale) deve essere svolto ad ogni stampa.

##### 4.6.1.4.3 Costo Build

Nella fase di build, ad ogni stampa si svolgono il tempo di warm-up e raffreddamento e, anche in questo caso il tempo di stampa è stato preso dal software Cura inserendo i pezzi nel numero che si vuole produrre.

##### 4.6.1.4.4 Costi post-process

Il costo del post-process non varia per pezzo in quanto il tempo di lavorazione per ciascun pezzo necessario per la rimozione dei supporti e la rifinitura rimane sempre uguale.

Di seguito una tabella con i costi al variare della grandezza del lotto:

##### Collettore Inferiore

pezzi	Costo operatori	Macchina	Materiale	totale
1	26,50 €	1,85 €	0,45 €	28,80 €
10	9,76 €	1,22 €	0,45 €	11,43 €
100	8,23 €	1,10 €	0,45 €	9,78 €
1000	8,11 €	1,10 €	0,45 €	9,66 €

##### Collettore Superiore

pezzi	Costo operatori	Macchina	Materiale	totale
1	28,00 €	1,78 €	0,61 €	30,39 €
10	11,26 €	1,54 €	0,61 €	13,41 €
100	10,00 €	1,52 €	0,61 €	12,13 €
1000	9,87 €	1,52 €	0,61 €	12,00 €

Tab 4.4 e 4.5 Costi ottenuti dal modello per le due parti del collettore.

Si può vedere come i costi maggiori siano quelli degli operatori, che costituiscono l'85/95 % del costo per unità, mentre i costi del materiale e della macchina sono una piccola percentuale.

#### 4.6.1.5 Confronto con i siti

Costi FDM ABS	3DHUBS	SD3D	Craftcloud	Modello di costo
1	41,56 €	68,00 €	19,72 €	59,19 €
10	13,28 €	14,98 €	3,31 €	24,84 €
100	6,15 €	6,47 €	2,57 €	21,91 €
1000	3,75 €	5,34 €	1,67 €	21,66 €

Tab. 4.6: Costi collettore per FDM in ABS

I prezzi ottenuti dal modello di costo sono più alti di circa 15 € rispetto alla media dei costi ottenuti dai siti. Le principali motivazioni potrebbero essere ricondotte ad una poca automatizzazione del processo dovuta a:

- Pochi pezzi per stampa, l'operatore deve ogni volta ripetere le operazioni di setup e caricamento del materiale sulla macchina.
- Rimozione dei supporti e rifinitura del pezzo, che costituiscono un prezzo fisso che non varia con la quantità prodotta e rimane costante.
- I supporti possono essere realizzati con materiali solubili in acqua e quindi la loro rimozione potrebbe essere automatizzata e semplificata sotto questo aspetto, abbassandone i costi soprattutto per quanto riguarda la produzione di lotti più grandi.

Ciò comporta un elevato utilizzo di manodopera che determina una crescita dei pezzi. Inoltre, nel nostro modello di costo sono stati inseriti i costi di manodopera in Italia, mentre alcuni siti hanno stabilimenti in paesi in via di sviluppo dove il costo della manodopera è minore.

#### 4.6.2 Modello di costo per stereolitografia

Il modello di costo per questo tipo di processo ha la stessa struttura di quello precedentemente usato per FDM; cambiano il materiale, i tempi della macchina e la fase di post-produzione.

Come stampante di riferimento è stata presa una stampante Formlab Form 3, in grado di usare la resina scelta Accura SL5300 scelta per il nostro componente. È una stampante abbastanza piccola, adatta a realizzare particolari di piccole dimensioni, con elevata precisione. Ha un costo molto basso rispetto alle altre macchine prese in considerazione, di soli 3299 €. La simulazione della stampa è stata eseguita con Preform, che nasce proprio per lavorare con le stampanti di questo produttore.

##### 4.6.2.1.1 Costo del materiale

La tipologia di resina con cui viene realizzati i particolari, che deve avere una buona resistenza al calore, ha un costo elevato rispetto al materiale usato per FDM e SLS, costa 195 € al litro. In più, al contrario del SLS il particolare per essere costruito ha bisogno di supporti, che dovranno poi essere rimossi. Per questo tra le varie tecnologie è quella che comporta un costo maggiore per quanto riguarda il materiale. Per stimare il materiale necessario è stato utilizzato PreForm.

##### 4.6.2.1.2 Pre-build

Il costo, per quanto riguarda la fase di pre-build, è identico al FDM. La resina andrà versata nell'apposito contenitore e verrà preparato il pezzo nel software per la stampa.

### 4.6.2.1.3 Build

La simulazione con Preform ci ha restituito anche la stima del tempo di stampa, a cui vanno sommati i tempi di warm-up e raffreddamento ad ogni stampa.

### 4.6.2.1.4 Post-Process

Una volta realizzata la stampa, i pezzi devono essere lavati, per automatizzare il processo esistono delle macchine apposite, nel nostro caso viene presa Form Wash, che utilizza alcol isopropilico (IPA). Il tempo medio del lavaggio è di quindici minuti e successivamente i pezzi dovranno essere asciugati e a quel punto si potranno rimuovere i supporti. Una volta rimossi, per ottenere le massime proprietà meccaniche, si utilizza Form Cure, un'altra macchina, che tramite dei raggi UV, polimerizza il materiale ad una temperatura di 80° C per un periodo di circa sessanta minuti. I costi per queste macchine sono di 499 € per la Form Wash e 699 € per la Form Cure; come per la stampante viene considerata la manutenzione e i costi per le infrastrutture uguale al 5% del costo delle macchine.

<b>materiale</b>	High Temperature Resin
costo	195 €/l

Costo operatore 1	30 €/h
Costo operatore 2	20 €/h

<b>Nome</b>	Fuse 3
Costo acquisto macchine	3299 €
Costo infrastrutture all'anno	164,95 €
Costo Manutenzione annuale	164,95 €
periodo ammortamento	3 anni
tasso di attualizzazione	0,1
costo di ammortamento	1.326,58 €
ore impiego macchina	4380 h
load factor	50%
costo energia	0,06 €/KWh
potenza	0,22 KWh
<b>costo orario macchina</b>	<b>0,39 €/h</b>

<b>Macchine aggiuntive</b>	Form Wash e Form Cure
Costo Form Wash	499 €
Costo Form Cure	699 €
Costo infrastrutture all'anno	59,90 €
Costo Manutenzione annuale	59,90 €
periodo ammortamento	3 anni
tasso di attualizzazione	0,1
costo di ammortamento	481,73 €
ore impiego macchina	4380 h
load factor	50%
costo energia	0,06 €/KWh
potenza	0,22 KWh
<b>costo orario macchina</b>	<b>0,15 €/h</b>

<b>Nome pezzo</b>	Collettore superiore
Volume pezzo+ supporti	11,19 ml
rapporto riempimento supporti	0,5
orientamento	orizzontale
<b>costo materiale</b>	<b>2,18 €</b>

<b>PRE-BUILD</b>	
preparazione prima stampa	0,5 h
Costo prep. prima stampa	15,00 €
tempo per build-setup(op,macch)	0,1 h
Costo setup	3,04 €
<b>Costo pre-build</b>	<b>18,04 €</b>

<b>BUILD</b>	
tempo warm-up	0,1 h
tempo di stampa	3,25 h
tempo raffreddamento	0,1 h
tempo build	3,45 h
costo supervisione	10,35 €
Costo macchina stampa	1,35 €
<b>Costo di processo di stampa</b>	<b>11,70 €</b>

<b>POST PROCESS</b>	
tempo lavaggio e asciugatura	0,5 h
tempo rimozione supporti	0,2 h
tempo polimerizzazione	1 h
costo macchine post-process	0,23 €
Costo operatore	11,20 €
Costo beni consumabili (es alcool)	0,10 €
<b>Costo Post-process</b>	<b>11,53 €</b>

<b>Costo Totale</b>	<b>43,45 €</b>
---------------------	----------------

Fig 4.18: modello di costo stereolitografia

Come già sapevamo, il processo di stereolitografia è il più costoso; ciò è dovuto all'elevato costo del materiale e alla fase di post-process, dove oltre alla rimozione dei supporti è necessaria anche la polimerizzazione del pezzo per ottenere le proprietà fisiche necessarie.

Il costo orario delle macchine è comunque abbastanza basso in quanto, anche se sono state usate tre macchine diverse, hanno un costo totale minore alle altre tecnologie, incidendo poco sul costo finale del pezzo.

Anche in questo caso il costo dell'operatore costituisce all'incirca il 90% del costo finale; nonostante sia stato automatizzato il lavaggio e in generale la fase di post-process, dove è comunque necessaria la rimozione dei supporti manuale. Un altro fattore che incide sul costo dell'operatore è il basso numero di pezzi per stampa, che inserendoli in verso verticale per avere il numero maggiore dei pezzi possibili per stampa, equivale a circa trenta. Così facendo però, si è aumentata la quantità di materiale di supporto necessario, che inciderà sui costi dell'operatore; non è però un aumento di costo che si può quantificare e si potrebbe calcolare solo sperimentalmente.

#### 4.6.2.2 Costi e produzione di più componenti

Come prima cosa è stata variata la grandezza del lotto per vedere in che modo varia il prezzo per le due parti del collettore:

Collettore Inferiore

N°pezzi	costo materiale	costo operatore	costo macchina	costo per pezzo
1	1,71 €	39,55 €	1,62 €	43,35 €
10	1,71 €	22,27 €	0,93 €	24,91 €
30	1,71 €	9,67 €	0,50 €	11,88 €
100	1,71 €	9,62 €	0,50 €	11,83 €
1000	1,71 €	9,58 €	0,50 €	11,79 €

Collettore Superiore

N°pezzi	costo materiale	costo operatore	costo macchina	costo per pezzo
1	2,35 €	43,30 €	2,20 €	48,45 €
10	2,35 €	20,48 €	1,13 €	23,96 €
30	2,35 €	15,79 €	0,56 €	18,70 €
100	2,35 €	15,71 €	0,56 €	18,62 €
1000	2,35 €	15,66 €	0,56 €	18,57 €

Collettore 1+1

N°pezzi	costo per pezzo
1	91,80 €
10	48,87 €
100	30,45 €
1000	30,36 €

Tab 4.7: Costi del collettore per il modello di costo stereolitografia

#### 4.6.2.3 Confronto coi i siti

Costi SLA				
Quantità	3DHUBS	Xometry	Protolabs	Media
1	97,94 €	130,39 €	254,06 €	160,80 €
10	41,47 €	56,65 €	88,31 €	62,14 €
100	28,03 €	36,12 €	62,91 €	42,35 €
1000	19,45 €	36,12 €	60,31 €	38,63 €

*Tab 4.8: Costi dei siti per SLA con Accura SL5300*

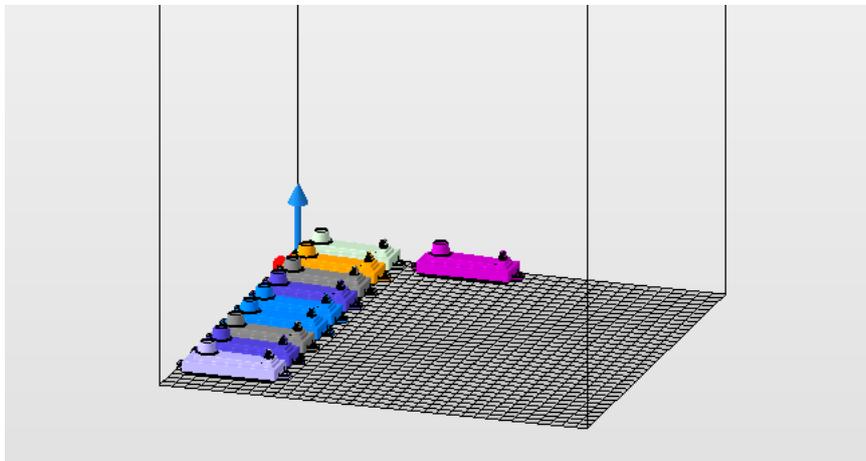
Dal confronto con i siti si può ritenere il nostro modello di costo abbastanza valido, considerando oltre al guadagno e altre spese (come imballaggio, stoccaggio, ecc.), i costi sono abbastanza simili soprattutto considerando i lotti più grandi.

#### 4.6.3 Modello di costo per Selective Laser Sintering

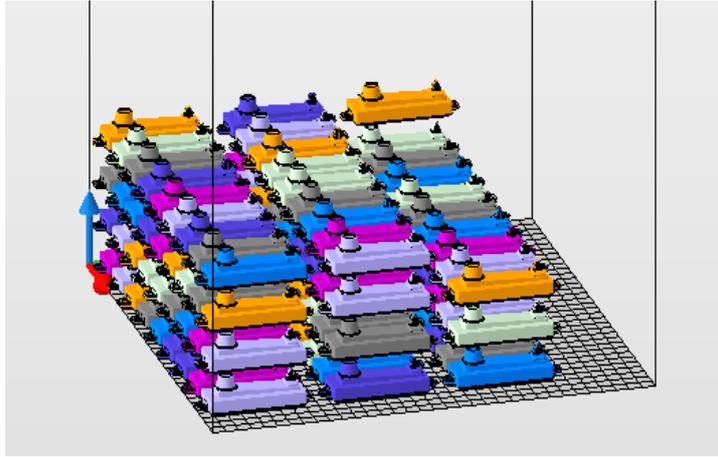
L'analisi dei costi per SLS è stata fatta simulando il processo con Netfabb, software per simulare la stampa, e il modello di costo realizzato da Tombolini Tommaso. Netfabb è servito per inserire nel modello di costo, oltre alle dimensioni del pezzo (lunghezza, larghezza, altezza, volume, area), la build height ovvero l'altezza totale dei componenti nella camera di stampa. La simulazione della stampa è stata fatta per numero pezzi uguale a 1, 10, 100 e riempiendo la camera di stampa. Come macchina è stata presa EOS P395. Per il collettore superiore il numero massimo per stampa è 459 pezzi, mentre la parte inferiore è di 540.

Il modello di costo del collega analizza più a fondo le fasi rispetto a quello usato precedentemente, inoltre calcola da sé il tempo di stampa. La macchina scelta è EOS P395, da cui derivano vari parametri come la potenza e quindi il consumo di energia, i tempi di warm-up e raffreddamento, il tempo di recoating di un layer, il diametro del laser e la sua velocità.

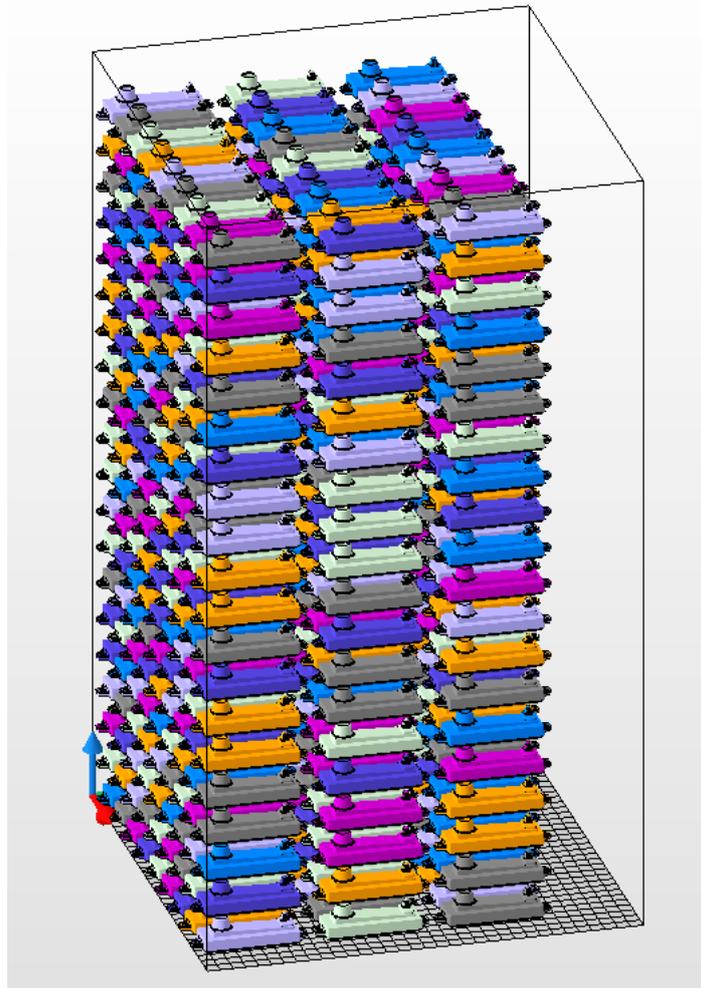
Per quanto riguarda il materiale, il modello di costo calcola da sé anche il materiale necessario tenendo conto anche della polvere che potrà essere riciclata nelle stampe successive e quella che invece verrà persa.



*Fig.4.19: Simulazione 10 pezzi Netfabb*



*Fig 4.20: Simulazione 100 pezzi Netfabb*



*Fig:4.21 simulazione camera piena Netfabb*

COLLETTORE SUPERIORE		
size z	mm	26,2
volume	mm3	11241
area	mm2	11537,8
numero componenti lotto	build height (mm)	costo singolo componente (€)
1	26,2	426,51 €
10	26,2	43,09 €
100	131,2	6,17 €
camera piena = 459	586,2	3,06 €

COLLETTORE INFERIORE		
size z	mm	22,7
volume	mm3	9882
area	mm2	9913,7
numero componenti lotto	build height (mm)	costo singolo componente (€)
1	22,7	421,73 €
10	22,7	42,56 €
100	112,7	5,85 €
camera piena = 540	592,7	2,63 €

Tab 4.9: caratteristiche e costi dei componenti in SLS

Rispetto agli altri modelli costo, questo prende in considerazione una macchina industriale dal costo molto elevato, ma che consente di realizzare molti più componenti e più velocemente, risparmiando su altri fattori come il costo dell'operatore.

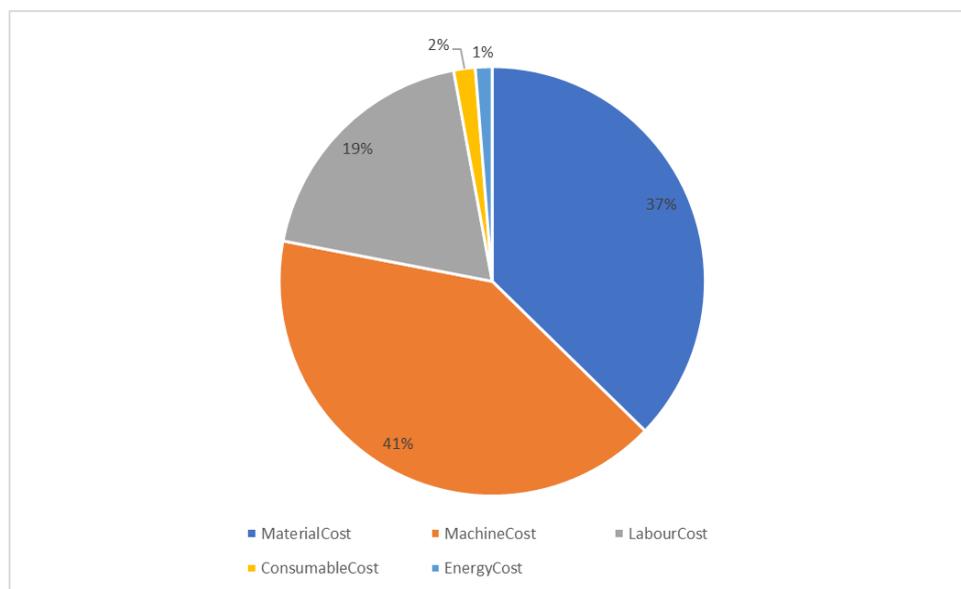


Fig.4.22 Percentuale dei costi per il modello SLS

Se infatti, nei modelli di costo precedenti, la maggior parte dei costi era dovuto all'operatore in questo caso, riempiendo la camera il costo maggiore è il costo della macchina, che insieme al costo dell'energia supera il 75%, del costo totale con il costo dell'operatore che non arriva neanche al 20%, mentre nelle altre tecnologie arrivava all'80%.

Con questa tecnologia e con questi tipi di macchina industriale è importante riempire la camera di stampa in quanto i tempi di preparazione e raffreddamento sono elevati (125 minuti per il warm-up, 90 minuti per il setup e 600 minuti il raffreddamento) con i relativi costi della macchina, energia e operatore. Non ha senso quindi compiere la stampa di un solo componente così piccolo come il collettore con questa macchina. Per questo, se

c'è bisogno di stampare uno o pochi componenti uguali, si potrebbe aspettare la richiesta di altri particolari, per poi realizzarli in una singola stampa così da abbassare il costo per unità.

A camera piena, però si ha costo unitario del collettore di circa 5,70 € e quindi un prezzo competitivo con il processo produttivo di stampaggio ad iniezione per lotti superiore a 2000 unità se si considera l'utilizzo di un nuovo stampo; intorno ai 500 pezzi se si considera i costi attuali della Nuova Simonelli.

#### 4.6.3.1 Confronto con i siti

Quantità	modello di costo	3dhubs	sd3d	protolabs	craftcloud	xometry	materialise
1	426,00 €	33,07 €	85,37 €	153,07 €	28,84 €	22,24 €	26,52 €
10	85,65 €	15,93 €	30,28 €	31,60 €	13,03 €	20,63 €	16,80 €
100	12,01 €	10,46 €	17,99 €	19,46 €	10,02 €	20,35 €	14,94 €
1000	5,69 €	9,21 €	14,08 €	18,26 €	9,09 €	20,35 €	13,90 €

Tab 4.10: confronto del modello di costo con i siti dei produttori in SLS PA 12

Confrontando i costi ottenuti dal modello di costo con quelli dei siti si evince che i primi sono circa la metà rispetto agli altri. Ciò si può spiegare che il nostro modello di costo non considera la pulizia dei pezzi, l'imballaggio o altre spese che non possiamo sapere. Le aziende, sicuramente, avranno anche un guadagno. Perciò, questo modello di costo si può ritenere molto affidabile per quanto riguarda la fase produttiva.

#### 4.6.4 Analisi modello di costo per Multi-jet Fusion

Il modello di costo per la tecnologia Multi-jet fusion è un modello di costo parametrico, ovvero i costi non dipendono dal numero di pezzi ma solamente dal volume del particolare, in quanto dà per scontato che la camera di stampa venga riempita. Il modello di costo prende come riferimento 4 macchine diverse e ridà 4 prezzi diversi. Le macchine si differenziano come scopo: l'HP MJF 5200 nasce come macchina per produzione in serie, più adatta a stampare di continuo, le altre nascono per la prototipazione rapida o comunque per la produzione per lotti minori.

Per dare un costo parametrico il modello di costo ipotizza un volume effettivo (il materiale che viene effettivamente lavorato) di stampa pari al 10% della camera, da qui ricava tempo di stampa, materiale utilizzato ecc.

Come già detto il materiale utilizzato in questa tecnologia è il PA 12.

	Volume (cm3)	Costo Con MJF 5200	JF 4200	JF 580	JF 540
Collettore Inferiore	5,2	1,47 €	1,83 €	3,14 €	2,95 €
Collettore superiore	8,3	2,34 €	2,92 €	5,01 €	4,70 €
Collettore 1+1	13,5	3,81 €	4,75 €	8,15 €	7,65 €

Tab 4.11 tabella dei prezzi ottenuti dal modello di costo MJF

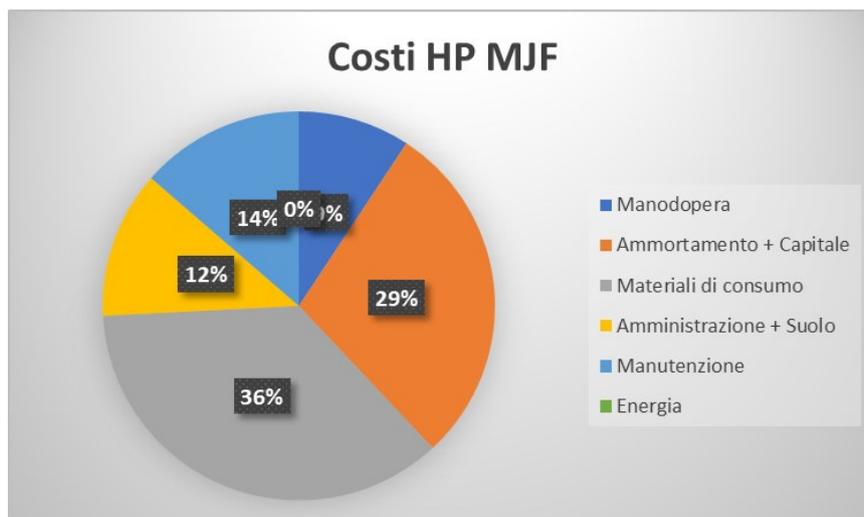


Fig 4.23: Percentuale costi HP MJF 5200

A differenza delle altre tecnologie la percentuale più alta è il costo del materiale che arriva al 36%, dove oltre alla polvere vengono presi in considerazione anche gli agenti. Il costo della manodopera è in percentuale molto più basso rispetto ai modelli di costo visti precedentemente. Questo è dovuto alla capacità della macchina di realizzare lotti molto grandi velocemente. A differenza della tecnologia SLS, il costo dell'energia risulta praticamente insignificante, questo è dovuto al risparmio che si ha nel non utilizzare un laser che scioglie direttamente il materiale ma ricorrendo a degli additivi che semplificano l'operazione.

#### 4.6.4.1 Confronto con i siti

3DHUBS	Protolabs	Craftcloud	Xometry	media
34,30 €	69,84 €	38,38 €	23,22 €	38,40 €
16,88 €	23,72 €	11,79 €	17,58 €	16,94 €
10,56 €	15,98 €	8,25 €	11,34 €	11,75 €
9,80 €	13,93 €	7,49 €	9,36 €	10,40 €

Tab 4.12: costi ottenuti dai siti con MJF in PA 12

Come nel caso della sinterizzazione laser i costi ottenuti dal modello sono all'incirca la metà o in questo caso poco meno; anche in questo caso il nostro modello non include spese come imballaggio, stoccaggio e il guadagno. Sicuramente però si può ritenere il modello di costo affidabile per quanto riguarda la fase di produzione vera e propria.

Per quanto riguarda il confronto con lo stampaggio ad iniezione la tecnologia HP MJF si può considerare la più conveniente e più affidabile insieme alla SLS ed inoltre essendo una tecnologia appena nata (è stata presentata nel 2015) è quella con possibilità di miglioramento maggiori tra le tecnologie AM soprattutto per quanto riguarda i materiali.

## 5 Considerazioni finali

Dopo l'analisi realizzata per le tecnologie, siamo giunti alle considerazioni finali.

Tra le piattaforme usate per avere i preventivi, c'è una differenza di prezzo abbastanza ampia tra le stesse tecnologie e magari, dopo un'analisi dettagliata da parte degli operatori presenti in quasi tutti i siti, i prezzi dati potrebbero cambiare, ma analizzando ciò che abbiamo ottenuto, i siti più affidabili e convenienti ci sono sembrate 3DHUBS, PROTOLABS e Xometry. Il primo unisce precisione e prezzi abbastanza bassi con la tecnologia SLS in PA 12; inoltre, essendo una rete di produttori, potrebbe essercene uno a pochi chilometri di distanza, limitando i costi di spedizione. Il secondo è quello che offre una maggiore gamma di materiali, garantisce una corretta realizzazione dei pezzi e la sua piattaforma di certificazione e tra le più guidate e semplici da utilizzare.

I modelli di costo si sono rivelati un ottimo metodo per approfondire i processi di produzione dei componenti. I costi che abbiamo ottenuto hanno dato soltanto nel caso del FDM dei risultati imprevisti: se, nei siti, risultava la tecnologia più a basso costo, nel modello si arriva a un prezzo 3 volte superiore nel caso dei lotti maggiori. Il problema è stato nel non poter automatizzare il processo nel caso della macchina scelta e quindi ha un'elevata quantità di manodopera richiesta. Nel caso del SLA ci possiamo ritenere soddisfatti, visto che il nostro costo è di circa il 20% più basso e si può considerare quindi affidabile. Anche i modelli di costo del SLS e Multi-jet Fusion, come già immaginavamo, si sono rivelati affidabili e quindi buoni per quantificare i soli costi di produzione e quindi apprendere quali sono le spese che li caratterizzano se si volesse valutare l'investimento in uno di questi tipi di macchine.

La produzione per Additive Manufacturing può essere, in tutte le tecnologie, sicuramente utile per realizzare prototipi e fare test. Ad esempio, anche la stereolitografia - la tecnologia di Additive Manufacturing con costi maggiori - potrebbe rivelarsi molto utile, se si vuole studiare il flusso delle acque di scarico durante il funzionamento della macchina, infatti, realizzando i componenti con la resina Accura SL5530 otteniamo dei pezzi trasparenti, adatti alle alte temperature. Infatti, se dovessi acquistare una stampante per realizzare particolari di piccole dimensioni (come i componenti della Nuova Simonelli) per prototipazione rapida, sceglierei proprio questa tecnologia, in quanto con un costo di circa 5000 € per tutto il set, si ottiene un prodotto finito con ottime proprietà meccaniche e precisione. Se, invece dovessi realizzare pezzi più grandi, sempre per prototipazione, sceglierei la tecnologia FDM, acquistando ad esempio Ultimaker S5 Pro, utilizzata nel modello di costo. Per quanto riguarda quest'ultima, anche se dai siti viene fuori un prezzo molto competitivo ed è il minore tra le tecnologie AM, la tecnologia non ha nel nostro caso una precisione tale da assicurare la corretta realizzazione dei particolari (come visto nella realizzazione del pezzo in azienda).

Da questo si è arrivati che le tecnologie di additive competitive per la produzione in serie e con una precisione sufficiente per i nostri componenti sono Selective Laser Sintering e Multi-jet Fusion. Entrambi i sistemi, realizzando i pezzi in NYLON 12, hanno prezzi confrontabili con quelli dello stampaggio ad iniezione anche sopra lotti maggiori di 1000, nel caso si consideri di dover realizzare uno stampo da zero. Considerando che, le aziende con cui sono stati fatti i preventivi devono avere un guadagno e che i modelli di costo delle tecnologie di SLS e MJF si possono ritenere affidabili, si può approssimare un costo di produzione del collettore tra i 6-7 € molto simile al costo, con stampo realizzato da zero, dello stampaggio ad iniezione per lotti fino ai 2000 pezzi. Quindi, se si pensasse in un investimento in una macchina per produrre componenti in Additive Manufacturing, le tecnologie SLS e MJF, hanno costi simili all'iniezione plastica per lotti di medie dimensioni assicurando qualità, precisione e un aspetto che può rivelarsi utile, la velocità con cui si potrebbero realizzare i pezzi, con un tempo di pochi giorni tra la progettazione e avere già un intero lotto prodotto.

Sicuramente per rendere conveniente quest'investimento l'utilizzo della macchina dovrebbe essere continuo ed estenderlo alla realizzazione di altri pezzi, visto il grande investimento iniziale che richiede la macchina;

nei modelli di costo è stato considerato un load factor almeno del 50%, altrimenti il costo orario della macchina considerato sarebbe stato molto più alto.

Nel caso di realizzazione di lotti tra i 200 e 500 pezzi, si può anche pensare di affidare la realizzazione di questi pezzi a aziende esterne (alcuni siti sono aziende europee e hanno filiali anche in Italia), e avere comunque dei prezzi più bassi a quelli dello stampaggio ad iniezione.

Inoltre, nel caso del collettore la riprogettazione è stata limitata nel poter velocizzare l'assemblaggio dei due pezzi superiore e inferiore, in altri casi la riprogettazione in chiave AM potrebbe essere molto più vantaggiosa, potendo far risparmiare in alcuni casi su materiale, tempi di produzione e manodopera.

Un' ultima considerazione viene fatta su come i sistemi di additive manufacturing incidano sul ciclo di vita del prodotto. Si può produrre il componente soltanto quando è veramente necessario, eliminando quindi lo stoccaggio o lo scarto di pezzi già prodotti, in caso si dovesse modificare il disegno per esigenze del cliente o altre necessità.

quantità	siti				iniezione		modelli di costo			
	PA 12 SLS	PA 12 MJF	ABS FDM	PC SLA	INIEZ. STAMPO NUOVO	INIEZ. STAMPO ATTUALE	PA 12 SLS	PA 12 MJF	ABS FDM	PC SLA
1	52,16 €	38,40 €	36,28 €	160,80 €			426,00 €	6,09 €	59,19 €	91,80 €
10	19,33 €	16,94 €	11,85 €	62,14 €	1.099,60 €	300,20 €	85,65 €	6,09 €	24,84 €	48,87 €
100	14,22 €	11,75 €	7,75 €	42,35 €	111,04 €	31,10 €	12,01 €	6,09 €	21,91 €	30,45 €
1000	13,03 €	10,40 €	6,64 €	38,63 €	11,74 €	3,75 €	5,69 €	6,09 €	21,66 €	30,36 €
2000	13,03 €	10,40 €	6,64 €	38,63 €	6,25 €	2,26 €	5,69 €	6,09 €	21,66 €	30,36 €

*Tab 5.1: confronto riassuntivo di tutti costi ottenuti in questo studio*

## 6 Conclusioni

Lo scopo del presente lavoro era di valutare come l'Additive Manufacturing può sostituire le tecnologie di produzione tradizionali. In particolare, è stato condotto uno studio su:

- Il processo di stampaggio ad iniezione, analizzandone il costo dei processi, anche attraverso il software LeanCOST.
- Le tecnologie di additive Manufacturing, valutando quali sono quelle più adatte per la produzione dei componenti in base ai materiali, al grado di precisione e ai costi. Questo approfondimento è stato fatto attraverso l'uso di siti online che permettono la costificazione dei lotti e i modelli di costo costruiti da noi o presi da terzi.

I siti online ci hanno permesso di avere un primo confronto dei costi che riguardano l'additive manufacturing e quali sono le tecnologie e i materiali più adatti per avviare una produzione in serie dei componenti analizzati. Attraverso i modelli di costo, invece, abbiamo potuto approfondire ulteriormente le fasi dei processi che caratterizzano le varie tecnologie, capendo perché l'una è migliore dell'altra o in quali casi va preferita. Inoltre, abbiamo capito cosa comporta l'adozione di macchine industriali rispetto alle altre.

I dati ottenuti sono stati infine confrontati tra loro, riuscendo a capire quali sono gli eventuali vantaggi e svantaggi che comporta l'adozione delle tecnologie di additive manufacturing e le condizioni per cui risultano convenienti. Per la produzione di lotti di media grandezza, con queste tecnologie, ci potrebbe essere convenienza di adottare questi tipi di manifattura, ma dipende dalle caratteristiche del componente e dal suo utilizzo. Come si è potuto constatare dal confronto tra i costi per il copriresistenza, è sempre conveniente realizzarlo mediante lo stampaggio, tranne per piccolissimi lotti; mentre per il collettore le nuove tecnologie possono garantire un risparmio per un range di lotti di varia grandezza. Se i componenti fossero stati con una complessità maggiore o fosse stato possibile sfruttare ancora di più i vantaggi che la riprogettazione in ottica AM offre, probabilmente lo spazio di convenienza aumenterebbe ulteriormente. Inoltre, bisogna considerare che è solo qualche anno che l'industria si è resa conto delle potenzialità che queste tecnologie sono in grado di dimostrare iniziando solo ora ad investirci, per questo ci saranno ulteriori passi avanti e innovazioni nei prossimi anni che porteranno ad una competitività sempre maggiore delle tecnologie di additive manufacturing ed un loro maggior utilizzo.

## 7 Bibliografia

- [1] Filippo Gabrielli, Rosolino Ippolito, Fabrizio Miccari: Analisi e tecnologia delle lavorazioni meccaniche, McGraw-Hill, 2012
- [2] Paul Alexander, Seth Allen Debasish Dutta: Part orientation and build cost determination in layered manufacturing (1998)
- [3] Matthew Franchetti & Connor Kress: An economic analysis comparing the cost feasibility of replacing injection molding processes with emerging additive manufacturing techniques. (2016)
- [4] Guido Tosello, Alessandro Charalambis, Laoucine Kerbache, Michael Mischkot, David Bue Pedersen, Matteo Calaon, Hans Nørgaard Hansen: Value Chain and production cost optimization by integrating additive manufacturing in injection molding process chain. (2018)
- [5] Tesi di laurea di Davide Caprioli, Politecnico di Milano, a.a 2014/2015
- [6] Tesi di laurea Luca Manuguerra, Università Politecnica delle Marche, a.a. 2018/2019
- [7] Tesi di laurea di Faggionato Giulia, Università degli studi di Padova, a.a. 2013/2014

## 8 Sitografia

- <1> sito web: [https://en.wikipedia.org/wiki/Design\\_for\\_additive\\_manufacturing](https://en.wikipedia.org/wiki/Design_for_additive_manufacturing)
- <2> sito web: <https://www.protolabs.com/>
- <3> sito web: <https://manufat.com/>
- <4> sito web: <https://www.sd3d.com/>
- <5> sito web: <https://prototek.it/>
- <6> sito web: <https://www.materialise.com/it/manufacturing/materialise-onsite>
- <7> sito web: <https://xometry.de/en/>
- <8> sito web: <https://craftcloud3d.com/>
- <9> sito web: <https://www.3dhubs.com/>