UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Meccanica

STUDIO E SVILUPPO DI UN MODELLO DI COSTO ANALITICO PER LA PREVENTIVAZIONE DEL PROCESSO DI STEREOLITOGRAFIA

STUDY AND DEVELOPMENT OF AN ANALYTICAL COST MODEL ESTIMATION OF THE STEREOLITHOGRAPHY PROCESS

Relatore:

Prof. Michele Germani

Tesi di laurea di:

Claudio Todo

Correlatore:

Dott. Ing. Marco Mandolini

Dott.ssa Federica Santucci

Anno Accademico 2019-2020

I. INDICE

I. INDICE ____ i

1 INTRODUZIONE ____ 1

2 STUDIO DELLA TECNOLOGIA ____ 2

2.1 STEREOLITOGRAFIA ____ 2

2.1.1 PROGETTAZIONE ____ 3

2.1.2 STAMPA ____ 3

2.1.3 POST PROCESSI ____ 4

2.2 MATERIALI ____ 4

2.3 MACCHINE ____ 5

2.3.1 STAMPANTI 3D ____ 5

2.3.2 MACCHINE PER IL POST PROCESSO DI STAMPA ____ 8

3 DATABASE ____ 9

3.1 DATABASE MACCHINE ____ 9

3.1.1 COSTO ORARIO DELLA MACCHINA ____ 11

3.2 DATABASE MATERIALI ____ 13

3.3 ACCURATEZZA ____ 15

4 MODELLO DI COSTO ____ 16

4.1 PARAMETRI DEL COMPONENTE ____ 16

4.2 BUILDING ____ 18

4.2.1 CALCOLO DEL TEMPO DI COSTRUZIONE ____ 18

4.2.2 CALCOLO DEL COSTO DI COSTRUZIONE ____ 22

4.2.3 ALTRE INFORMAZIONI ____ 23

4.3 POST-BUILDING ____ 24

4.3.1 LAVAGGIO ____ 24

4.3.2 FOTOPOLIMERIZZAZIONE POST STAMPA ____ 25

4.3.3 RIMOZIONE DEI SUPPORTI ____ 25

5 CASO STUDIO ____ 26

5.1 OTTENIMENTO DEI PARAMETRI ____ 26

6 Risultati e discussione ____ 28

6.1 RISULTATI OTTENUTI ____ 28

6.1.1 COLLETTORE DI SCARICO INFERIORE ____ 29

6.1.2 COLLETTORE DI SCARICO SUPERIORE 31
6.2 DISCUSSIONE DEI RISULTATI 32
6.3 ALTRE CONSIDERAZIONI 34
6.3.1 ANDAMENTO DEL COSTO AL VARIARE DELLA RESINA 34
6.3.2 ANDAMENTO DEL COSTO AL VARIARE DEL GRADO DI ACCURATEZZA 35
6.3.3 COSTI CHE CONTRIBUISCONO ALLA COSTRUZIONE DEL PEZZO 36
6.3.4 COSTO TOTALE DELLA PRODUZIONE DI UNA PARTE 37
6.4 IL PROBLEMA DELLA SOVRAPPOSIZIONE DELLE PARTI 38
7 CONCLUSIONI 39
8 BIBLIOGRAFIA 40

1 INTRODUZIONE

La produzione additiva (*Additive Manufacturing* o AM) è una tecnologia che si basa sulla creazione di parti tridimensionali a partire da un modello 3D progettato al computer. Grazie alle recenti innovazioni in ambito meccanico, dei materiali e dei software risulta particolarmente diffusa ed accessibile ad una vasta gamma di settori tra cui ingegneria, odontoiatria, gioielleria ed intrattenimento. Alcuni esempi di produzione additiva sono la stereolitografia (SLA), la modellazione a deposizione fusa (FDM) e la sinterizzazione laser (SLS).

La stereolitografia (*Stereolithography* o SLA) è stata la prima tecnica sviluppata nell'ambito delle tecnologie di produzione additiva, infatti il suo primo studio risale al 1981 da parte del ricercatore H. Kodama, mentre il suo sviluppo avviene grazie al contributo di C. Hull e del Dr. Y. Maratuni tra il 1984 ed il 1985 [1].

Il suo funzionamento consiste nell'uso di un raggio laser UV che indurisce una resina liquida fotosensibile contenuta in un serbatoio per creare, strato dopo strato, la forma 3D desiderata. È una buona soluzione per la creazione di solidi precisi, dettagliati e che necessitano di una elevata qualità, ma permette anche di ottenere ottimi attributi meccanici quali isotropia, impermeabilità e versatilità del materiale.

L'obiettivo di questa tesi è quello di creare e sviluppare un modello di costo analitico e dettagliato che possa fornire un preventivo per la durata ed il costo della produzione del processo di stereolitografia.

Per fare ciò si partirà da una ricerca bibliografica dalla quale verranno estratte sia le informazioni utili alla formulazione dei tempi e dei costi di fabbricazione, che quelle riguardanti i parametri di macchina e le caratteristiche dei materiali. Infine, si effettuerà il confronto tra il prezzo ottenuto dal modello di costo sviluppato ed i prezzi dei preventivi forniti online da diverse aziende di stampa 3D per due determinati componenti.

2 STUDIO DELLA TECNOLOGIA

2.1 STEREOLITOGRAFIA

La stereolitografia (SLA) è una tecnica di stampa 3D appartenente alla famiglia di tecnologie di produzione additiva (*Additive Manufacturing* o AM) e più nello specifico dei processi di polimerizzazione in vasca (*Vat Polymerization* o VP) nei quali un liquido polimerizza attraverso l'azione di un raggio laser.

La stereolitografia è in grado di realizzare parti con un tempo di stampa molto breve e con un'elevata qualità del risultato finale, soprattutto a livello estetico, ma non ne trascura le caratteristiche meccaniche. È per questo che le parti da stereolitografia vengono usate nei settori più vari come ingegneria, odontoiatria, gioielleria ed intrattenimento. È una tecnologia che si presta molto alla realizzazione di parti "da esposizione", ovvero modelli sui quali vengono svolti test di accoppiamento, verifiche dimensionali e studi di ergonomia.

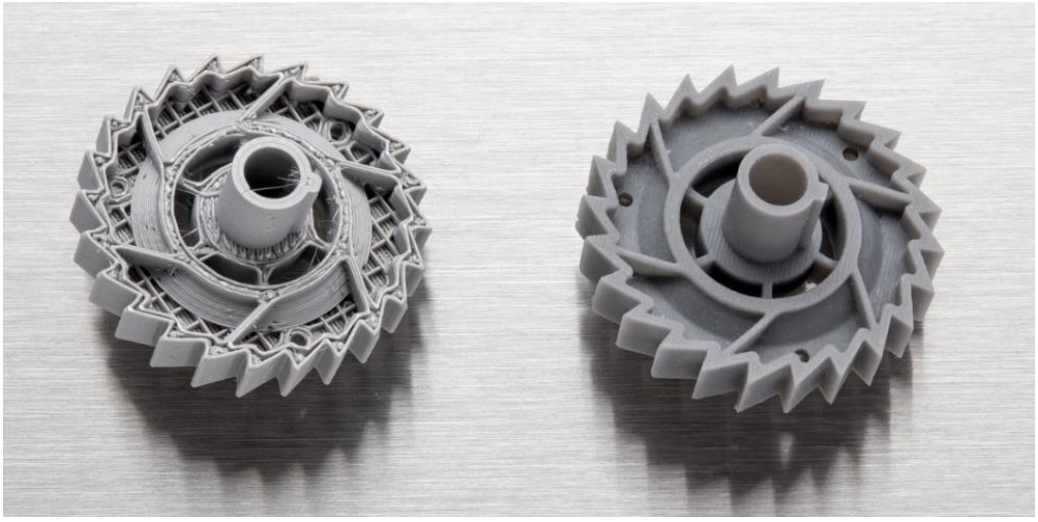

Figura 1: Stessa parte creata in FDM (sinistra) e in SLA (destra)
https://formlabs.com/it/blog/fdm-sla-sls-scegliere-tecnologia-stampa-3d/

2.1.1 PROGETTAZIONE

Attraverso un software di modellazione 3D si crea il pezzo da stampare e lo si esporta in un file 3D stampabile (solitamente in formato STL) che sarà usato dal software della macchina SLA per specificare le impostazioni di stampa. Queste comprendono la suddivisione del modello in strati (*slicing*), la creazione delle strutture di supporto, che sono necessarie per sorreggere le parti del pezzo che non hanno sotto di loro altro materiale, e il nesting nel caso la produzione coinvolga più pezzi.

2.1.2 STAMPA

La fase di stampa prevede l'uso di un raggio laser UV che agisce selettivamente sulla superficie di una resina liquida fotosensibile contenuta in una vasca andandola a polimerizzare, ovvero a solidificarla istantaneamente. La parte di resina indurita corrisponde ad una sezione trasversale del prodotto finale che sarà costruito strato dopo strato, cioè mediante la sovrapposizione di diversi *layer*. Dopo il completamento di ogni strato, una piastra, posta sotto la vasca, si sposta verticalmente di una certa quantità permettendo al laser di polimerizzare lo strato successivo; lo spostamento della piastra corrisponde all'altezza del singolo *layer* e dipende dal grado di accuratezza superficiale desiderata, dal materiale e dalla macchina. Per quanto riguarda il raggio laser UV, questo viene proiettato da un sistema di specchi in modo tale da scandire la superficie del liquido ed ottenere la geometria desiderata. Il verso di spostamento della piastra dipende dall'approccio che sfrutta la stampante 3D:

- Approccio *Top-Down*: la sorgente UV è posta sopra la vasca e dopo il completamento di ogni strato la piastra si abbassa. Questo approccio permette di realizzare parti grandi e pesanti ad alta velocità e necessita di meno materiale per i supporti [2], però presuppone il fatto che la profondità della vasca definisca l'altezza massima del pezzo e quindi potrebbe portare ad un costo della resina estremamente elevato.
- Approccio *Bottom-Up*: la sorgente UV si trova sotto la vasca e dopo il completamento di ogni strato la piastra si alza. A causa delle deboli forze di adesione tra il fondo della vasca ed il pezzo, permette di realizzare parti di dimensioni ridotte, utilizzando però una quantità di resina notevolmente minore.

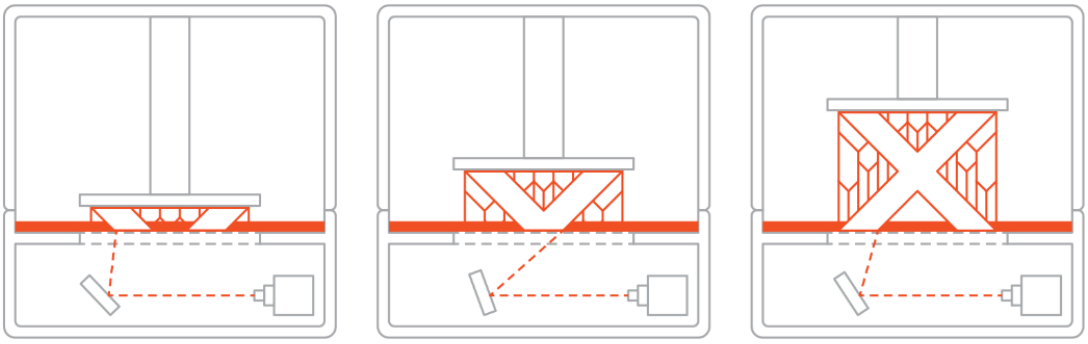

Figura 2: Processo di stampa SLA con approccio Bottom-up
https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-sla-3d-printing/

2.1.3 POST PROCESSI

Una volta completato il processo di stampa potrebbero essere necessarie alcune operazioni per ottenere il prodotto finito:

- Lavaggio: il pezzo viene inserito in una macchina apposita e viene lavato in alcol isopropilico (IPA) per rimuovere la resina non polimerizzata dalla superficie.
- Fotopolimerizzazione post-stampa o *Curing*: è un processo che permette al pezzo di raggiungere le caratteristiche meccaniche finali ed è molto importante per parti che hanno funzionalità ingegneristiche. Viene eseguita in un forno a raggi UV.
- Rimozione dei supporti: operazione manuale con la quale si rimuovono i supporti dalla parte.

Se il pezzo non corrisponde alle esigenze richieste può essere eventualmente lucidato, verniciato o lavorato meccanicamente.

2.2 MATERIALI

I materiali usati per la stereolitografia sono resine liquide termoindurenti o fotosensibili, ovvero resine che quando vengono esposte alla luce con una determinata lunghezza d'onda polimerizzano.

La scelta della resina, oltre ad influenzare le proprietà del pezzo finito, ha un forte impatto sui costi e sui tempi di stampa.

In questo studio si è deciso di raggruppare l'elevato numero di resine presenti in commercio in base alla loro composizione chimica ed alle proprietà meccaniche, ottenendo così tre famiglie:

- ABS-like: resine con caratteristiche simili all'ABS (*Acrilonitrile Butadiene Stirene*). Sono tenaci, resistenti agli urti ed hanno una elevata stabilità dimensionale. Le resine in commercio considerate per questa famiglia sono: Accura ABS Black (SL 7820), Somos WaterShed XC 11122, Tough 2000, Accura Xtreme, Accura Xtreme White 200, Somos NeXt ed Accura55.
- PP-like: resine con caratteristiche simili al PP (*Polipropilene*). Sono resistenti all'usura, flessibili e possono sopportare un allungamento elevato prima di rompersi. Le resine in commercio considerate per questa famiglia sono: Accura 25, Tough 1500 e la Durable Resin (della Formlab).
- PC-like: resine con caratteristiche simili al PC (*Policarbonato*). Sono estremamente resistenti agli urti, tenaci ed hanno una buona resistenza al calore. Le resine in commercio considerate per questa famiglia sono: Accura 5530, Somos PerFORM, Accura 60, Accura ClearVue ed Accura PEAK.

2.3 MACCHINE

La scelta della stampante 3D da usare influenza la successiva scelta della resina in quanto non sono sempre compatibili tra loro.

Le stampanti da SLA possono essere di due tipologie:

- Industriali: sono stampanti di grandi dimensioni ed hanno un elevato volume di stampa, infatti vengono impiegate per la produzione di un elevato numero di componenti. Sono molto costose.
- Desktop: sono stampanti di dimensioni ridotte e più accessibili grazie al costo contenuto. Sono consigliabili per la creazione di singole parti dalle piccole dimensioni.

2.3.1 STAMPANTI 3D

Le stampanti 3D prese in considerazione in questo studio sono:

- Stratasys V650 Flex: è una stampante industriale prodotta dall'azienda statunitense Stratasys. È in grado di usare una vasta tipologia di resine, ma non può creare strati con un'altezza minore di 0,100 mm.

Tabella 1: Caratteristiche Stratasys V650 Flex

Dimensioni (X Y Z)	508 x 508 x 584	mm
Potenza della macchina	1000	W
Diametro del fascio laser	0,127	mm
Potenza del laser	0,7	W

Figura 3: Stratasys V650 Flex
https://support.stratasys.com/en/printers/v650-flex

- Form2: è una stampante 3D desktop prodotta dall'azienda statunitense Formlabs. Ha accesso ad una gamma di resine leggermente ristretta rispetto alla Stratasys V650 Flex, ma in compenso è in grado di creare parti utilizzando altezze degli strati minore (0,025 ÷ 0,100 mm).

Tabella 2: Caratteristiche Form2

Dimensioni (X Y Z)	145 x 145 x 175	mm
Potenza della macchina	65	W
Diametro del fascio laser	0,14	mm
Potenza del laser	0,25	W

- Form3: è una stampante 3D desktop molto simile alla Form2, ma ha un volume di stampa leggermente maggiore e utilizza la tecnologia della *Low Force Stereolithography* (LFS). Questa è una tecnica avanzata di SLA che riduce le forze esercitate sulle pareti durante la stampa (permettendo la creazione di strutture di supporto leggerissime) attraverso l'uso di un serbatoio flessibile e di un'illuminazione lineare che consente di aumentare la precisione e la qualità superficiale delle parti.

Tabella 3: Caratteristiche Form3

Dimensioni (X Y Z)	145 x 145 x 185	mm
Potenza della macchina	220	W
Diametro del fascio laser	0,085	mm
Potenza del laser	0,25	W

Figura 4: A) Form2; B) Form3

https://formlabs.com/it/

2.3.2 MACCHINE PER IL POST PROCESSO DI STAMPA

Sono state prese in considerazione due macchine per la fase di post processo di stampa e sono:

- Form Wash: è la macchina che svolge la fase di lavaggio del pezzo dopo la fase di stampa ed ha lo scopo di rimuovere la resina non polimerizzata dalla superficie del pezzo stampato, il quale viene immerso e contemporaneamente agitato in una soluzione di alcol isopropilico (IPA).

Tabella 4: Caratteristiche della Form Wash

Tempo medio di lavaggio	15	minuti
Volume massimo di IPA	8,6	L
Stampe con volume max IPA	70	stampe

- Form Cure: è la macchina progettata per eseguire la fotopolimerizzazione post stampa necessaria a portare i componenti stampati alle loro massime proprietà meccaniche. È dotata di un sistema di riscaldamento avanzato che controlla con precisione la temperatura di polimerizzazione (fino a 80°C).

La Form Wash e la Form Cure sono entrambe prodotte dalla Formlabs e per questo sono compatibili solo con la Form2 e la Form3.

Non sono state approfondite le macchine di posto processo per la Stratasys V650 Flex.

Figura 5: Form Wash & Form Cure

https://support.formlabs.com/s/article/Form-Wash-and-Form-Cure

3 DATABASE

Prima di procedere alla realizzazione del modello di costo, si andranno a creare dei database riguardanti soprattutto le macchine ed i materiali presi in considerazione per questo studio. Questi dovranno contenere le informazioni che saranno necessarie per il calcolo delle velocità, dei tempi e dei costi della fase di costruzione del pezzo.

3.1 DATABASE MACCHINE

Per la creazione del database delle macchine sono stati utilizzati sia i *datasheet* di ciascuna stampante, che le informazioni ricavate dalla bibliografia e dai siti di vendita specializzati.

Sono state elencate le seguenti voci:

- Dimensione della camera di stampa in X, Y e Z (*plate width, plate length e building height*) e volume di stampa (*building volume*): sono necessari per accertarsi che le parti da stampare siano effettivamente contenute nella stampante;
- Prezzo della stampante (*price*);
- Potenza della macchina (*machine power*), potenza del laser (*laser power*) e diametro del fascio laser (*beam diameter*): sono essenziali per il calcolo dei tempi e dei costi di costruzione;
- Area di lavoro (*building area*): viene calcolata come la somma tra l'area della macchina e l'area di manovra dell'operatore. Per semplicità si è considerata l'area di lavoro come l'area della macchina con l'aggiunta di 1,5 m per ogni lato di questa;
- Tempo di riposizionamento (*recoating time*): è il tempo compreso tra il completamento di uno strato e l'inizio di quello successivo e può essere approssimato al solo tempo di spostamento verticale della piastra sulla quale viene stampato il pezzo;
- Costo annuale di manutenzione (*annual maintenance cost*): per questo studio è stato assunto come il 10% dell'investimento inziale (prezzo della stampante);
- Peso massimo sopportabile (*maximum part weight*): serve a verificare se le parti da costruire possono essere sopportate dalla stampante.

Tabella 5: Parametri di macchina Stratasys V650 Flex

Machine name	Parameter	Value	Unit of measure
StratasysV650Flex	Plate width	508	mm
StratasysV650Flex	Plate length	508	mm
StratasysV650Flex	Building height	584	mm
StratasysV650Flex	Price	200000	€
StratasysV650Flex	Machine power	1000	W
StratasysV650Flex	Annual maintenance cost	20000	€/year
StratasysV650Flex	Building area	10,5	m^2
StratasysV650Flex	Building volume	150,71	L
StratasysV650Flex	Beam diameter	0,127	mm
StratasysV650Flex	LaserPower	0,7	W
StratasysV650Flex	Recoating time	6	s
StratasysV650Flex	Maximum part weight	54,4	kg

Tabella 6: Parametri di macchina Form2

Machine name	Parameter	Value	Unit of measure
Form2	Plate width	145	mm
Form2	Plate length	145	mm
Form2	Building height	175	mm
Form2	Price	2900	€
Form2	Machine power	65	W
Form2	Annual maintenance cost	290	€/year
Form2	Building area	3,24	m2
Form2	Building volume	3,68	L
Form2	Beam Diameter	0,14	mm
Form2	LaserPower	0,25	W
Form2	Recoating time	6	s
Form2	Maximum part weight	2,25	kg

Tabella 7: Parametri di macchina Form3

Machine name	Parameter	Value	Unit of measure
Form3	Plate width	145	mm
Form3	Plate length	145	mm
Form3	Building height	185	mm
Form3	Price	3700	€
Form3	Machine power	220	W
Form3	Annual maintenace cost	370	€/year
Form3	Building area	3,8	m2
Form3	Building volume	3,89	L
Form3	Beam Diameter	0,085	mm
Form3	LaserPower	0,25	W
Form3	Recoating time	6	s
Form3	Maximum part weight	2,37	kg

3.1.1 COSTO ORARIO DELLA MACCHINA

Un altro dato importante per la stampante è il costo orario della macchina. Questo è stato calcolato come:

$$\text{costo orario macchina} = \text{costo orario ammortamento} + \text{costo orario manutenzione} + \text{costo orario affitto}$$

Il costo orario dell'ammortamento è stato calcolato usando il metodo di ammortamento lineare, ovvero:

$$\text{costo orario ammortamento} = \frac{\dfrac{\text{costo macchina} * (1 + \text{tempo ammortamento} * \text{interesse})}{\text{tempo ammortamento}}}{\text{tempo di lavoro}}$$

con il tempo di lavoro che è:

$$\text{tempo lavoro} = 365 * 24 * \text{LF}$$

LF sta ad indicare il *Load Factor*, ovvero il coefficiente di utilizzo della macchina [3].
Il costo orario di manutenzione è:

$$\text{costo orario manutenzione} = \frac{\text{costo annuale manutenzione}}{\text{tempo di lavoro}}$$

dove il costo annuale di manutenzione, come già detto, è stato assunto come il 10% del costo della macchina [4].

Il costo orario dell'affitto è:

$$\text{costo orario affitto} = \frac{\text{rata annuale affitto} * \text{area di lavoro}}{\text{tempo di lavoro}}$$

Tabella 8: Dati utilizzati per il calcolo orario della macchina (ex. Stratasys V650 Flex)

Name	Value	Unit of measure
Printer	StratasysV650Flex	-
Price	200.000 €	€
Annual maintenace cost	20000	€/year
Depreciation time	5	Years
Discount rate	8%	%
Building area	11	m^2
Building yearly rent rate	130	€/m^2/year
Machine discounted cost	280000	€
Load factor	57%	-
Working time	4993	h
Depreciation hourly rate	11,22	€/h
Maintenance hourly rate	4,0	€/h
Production overhead hourly rate	0,273	€/h
Machine hourly cost	15,49	€/h

Alla fine, si è ricavato il costo orario delle tre macchine prese in considerazione e, come si può vedere dalla Tabella 9, il costo orario della Stratasys V650 Flex è molto più grande rispetto a quelle delle due stampanti di tipo desktop.

Tabella 9: Costi orari delle macchine studiate

Stratasys V650 Flex	15,49 €	Stampante industriale
Form2	0,31 €	Stampante desktop
Form3	0,38 €	Stampante desktop

3.2 DATABASE MATERIALI

Come già detto in precedenza, sono state raccolte informazioni riguardanti 15 materiali e successivamente sono stati divisi in 3 famiglie (ABS-like, PP-like, PC-like) in base alle loro proprietà ed alla loro composizione chimica. Le informazioni che sono state prese in considerazione per la costruzione del database dei materiali sono:

- Densità (*density*);
- Costo (*cost*);
- Profondità di penetrazione (*penetration depth*): è una proprietà intrinseca della resina ed è definita come la profondità alla quale l'irraggiamento è ridotto di 1/e (circa il 37%) rispetto all'irraggiamento superficiale [5];
- Esposizione critica (*critical exposure*): è una proprietà intrinseca della resina e rappresenta l'esposizione minima al di sotto della quale la polimerizzazione non può avere luogo [5].

Tabella 10: Resine ABS-like

Name	Density [kg/mm3]	Cost [€/kg]	Penetration depth [mm]	Critical exposure [J/mm2]
Accura ABS Black (SL 7820)	0,00000113		0,114	0,000100
Somos WaterShed XC 11122	0,00000112	270	0,165	0,000115
Tough 2000 Resin	0,00000111	152		
Accura Xtreme	0,00000113		0,104	0,000117
Accura Xtreme White 200	0,00000112		0,117	0,000083
Somos NeXt	0,00000117	276	0,147	0,000120
Accura 55	0,00000113		0,132	0,000074

Tabella 11: Resine PP-like

Name	Density [kg/mm3]	Cost [€/kg]	Penetration depth [mm]	Critical exposure [J/mm2]
Accura 25	0,00000113		0,107	0,000105
Tough 1500 Resin	0,00000107	158		
Durable Resin	0,00000107	158		

Tabella 12: Resine PC-like

Name	Density [kg/mm3]	Cost [€/kg]	Penetration depth [mm]	Critical exposure [J/mm2]
Accura 5530	0,00000119		0,140	0,000075
Somos PerFORM	0,00000161	460	0,109	0,000078
Accura 60	0,00000113		0,160	0,000076
Accura ClearVue	0,00000110		0,155	0,000095
Accura PEAK	0,00000132		0,142	0,000115

Le informazioni riguardanti le resine citate nella Tabella 10, Tabella 11 e Tabella 12 sono state ottenute sia dai *datasheet* forniti dalle aziende produttrici, ovvero Formlabs, DSM e 3D Systems, che dai siti di vendita. Per avere una vista più riassuntiva sui materiali è stata fatta una media dei valori raccolti così da ottenere la Tabella 13 riepilogativa nella quale è stata aggiunta anche una colonna che ricorda le macchine utilizzabili per ogni categoria di materiali:

Tabella 13: Tabella riepilogativa delle resine

Name	Density [kg/mm^3]	Cost [€/kg]	Penetration Depth [mm]	Critical Exposure [J/mm^2]	Compatible machines
ABS-like	0,00000113	232,67	0,130	0,000102	StratasysV650Flex / Form2 / Form3
PP-like	0,00000109	158,00	0,107	0,000105	StratasysV650Flex / Form2 / Form3
PC-like	0,00000127	460,00	0,141	0,000088	StratasysV650Flex

3.3 ACCURATEZZA

È stato creato anche un piccolo database nel quale sono elencati i gradi di accuratezza che possono essere scelti per la creazione del pezzo, in quanto è in base a questo parametro che viene scelta l'altezza con la quale vengono stampati i singoli strati. Dalla Tabella 14 si può notare che all'aumentare dell'accuratezza (*accuracy*) diminuisce l'altezza del singolo strato (*layer thickness*).

Tabella 14: Gradi di accuratezza

Accuracy	Layer thickness [mm]
medium-high	0,100
high	0,050
very-high	0,025

È importante specificare che la Stratasys V650 non è in grado di stampare con i gradi di accuratezza che sfruttano un'altezza dello strato minore di 0,100 mm.

4 MODELLO DI COSTO

In questo capitolo si illustrerà nel dettaglio il modello di costo sviluppato e verranno descritti i parametri e le formule utilizzate per la sua creazione.

4.1 PARAMETRI DEL COMPONENTE

Il primo passo per la creazione del modello di costo è quello di elencare i parametri caratteristici del componente che verrà stampato. Questi sono i parametri che influenzano la scelta della macchina da usare, le velocità, i tempi ed i costi di produzione.

Nel modello di costo studiato si sono scelti i seguenti parametri:

- Ingombro nell'asse X ed ingombro nell'asse Y (*size X, size Y*): sono le dimensioni in X ed in Y della stampa che si vuole eseguire e sono necessari per individuare la stampante 3D da utilizzare, in quanto quelle desktop hanno un volume di stampa molto inferiore rispetto a quelle industriali;
- Altezza parte (*part height*): è l'altezza effettiva della parte da stampare senza considerare la struttura di supporto;
- Distanza della parte dalla piattaforma di costruzione (*distance from the platform*): senza questa distanza, i supporti sarebbero molto piccoli e difficili da rimuovere dalla parte;
- Ingombro nell'asse Z (*size Z*): coincide con l'altezza massima della stampa che si vuole creare, cioè è dato dalla somma dell'altezza della parte e dalla distanza di questa dalla piattaforma di costruzione. Oltre ad avere lo stesso scopo degli ingombri in X e Y, questo parametro è fondamentale per il successivo calcolo dei tempi di stampa, infatti il numero di strati che verrà polimerizzato per la creazione del pezzo aumenta all'aumentare dell'altezza della stampa, incrementando così il tempo di costruzione;
- Peso (*weight*): vale lo stesso discorso fatto per gli ingombri X e Y, infatti il peso sopportabile dalle macchine non è lo stesso;
- Numero delle parti da stampare (*n° of parts*): in questo modello di costo si è considerato di stampare contemporaneamente solo parti uguali tra loro, cioè con stessa geometria, volume, superficie, peso, tipologia dei supporti;

- Volume di una singola parte (*part volume*);
- Volume totale di tutte le parti (*total parts volume*): corrisponde al volume di una parte moltiplicato per il numero di parti da stampare;
- Volume totale dei supporti (*total supports volume*): viene considerato come il volume dei supporti di tutte le parti da stampare contemporaneamente e non come moltiplicazione tra il volume dei supporti di una singola parte per il numero di parti. Questo perché, nel caso i componenti vengano stampati su più piani, il volume dei supporti tra due parti che si trovano una sopra l'altra non verrebbe considerato.
- Superficie di una singola parte (*surface of the part*);
- Area orizzontale proiettata nel piano X-Y di una singola parte (*horizontal area in X-Y plane*);
- Materiale (*material*): la scelta del materiale influenza diversi fattori come la scelta della macchina, il peso delle parti da stampare, i tempi ed i costi di produzione;
- Accuratezza (*accuracy*): come visto nella Tabella 14, in base a questo parametro varia l'altezza dei singoli strati che si andranno a polimerizzare per la creazione del pezzo, quindi all'aumentare dell'accuratezza aumenta il numero di strati che serviranno per la creazione del pezzo.

Tabella 15: Parametri del componente

Size X (total)		mm
Size Y (total)		mm
Size Z (total)		mm
Weight (total)		kg
Part volume (x1)		mm^3
Total parts volume (total)		mm^3
Total supports volume (total)		mm^3
Surface of the part (x1)		mm^2
Horizontal area in X-Y plane (x1)		mm^2
Part height		mm
Distance from the platform		mm
N° of parts		-
Material		-
Accuracy		-

Le dimensioni degli ingombri (X, Y, Z), i volumi in gioco, la superficie, l'area orizzontale proiettata nel piano X-Y e l'altezza della singola parte sono dati che vengono ricavati direttamente dal software che analizza il file STL del modello 3D.

La distanza delle parti dalla piattaforma è un valore che viene scelto dall'operatore (come anche il materiale, l'accuratezza e il numero di parti da stampare) e, in questo studio, è stato scelto di 5,00 mm.

Il peso viene calcolato come somma del volume totale delle parti con il volume totale dei supporti, il tutto moltiplicato per la densità del materiale scelto per eseguire la stampa; questo è possibile nella stereolitografia perché il materiale con cui vengono costruiti i supporti è lo stesso dei componenti da stampare [6].

4.2 BUILDING

4.2.1 CALCOLO DEL TEMPO DI COSTRUZIONE

La creazione del componente avviene attraverso la sovrapposizione di strati di materiale di volta in volta polimerizzati. Come prima cosa, il laser scansiona (solidifica) il contorno della sezione della parte in quello specifico strato (si ricorda che il modello STL del pezzo da costruire è stato prima suddiviso in strati attraverso un software, quindi in ogni strato c'è una sezione del prodotto finale) e successivamente procede al "riempimento" interno che avviene mediante una solidificazione della resina con una specie di tratteggio (*hatching*). Un processo simile avviene per la creazione dei supporti.

Il tempo totale per la costruzione di un pezzo corrisponde quindi al tempo impiegato per la costruzione di tutti gli strati che lo formano, ed è dato dalla somma di:

- Tempo di scansione del contorno
- Tempo di tratteggio
- Tempo di scansione dei supporti
- Tempo di riposizionamento

A questi viene sommato il tempo di set-up della macchina che è pari a 30 minuti [7].

4.2.1.1 TEMPO DI SCANSIONE DEL CONTORNO

Il tempo necessario per la costruzione del contorno della parte da costruire [8] viene calcolato come:

$$\text{tempo scansione contorno} = \frac{\text{superficie totale parti} - \text{area orizzontale totale parti}}{\text{altezza strato} * \text{velocità scansione}} * \text{numero passate}$$

con la superficie totale dei pezzi e l'area orizzontale totale dei pezzi che sono ottenuti moltiplicando i loro rispettivi valori riferiti alla singola parte per il numero di parti. Il numero delle passate corrisponde al numero di volte che viene eseguito il contorno in ogni strato e, in questo studio, è stato assunto un valore pari a 2.

La velocità di scansione [5] è:

$$\text{velocità scansione} = \left[\sqrt{\frac{2}{\pi}} * \frac{\text{potenza laser}}{\text{raggio fascio laser} * \text{esposizione critica}} * e^{-\left(\frac{\text{profondità polimerizzazione}}{\text{profondità di penetrazione}}\right)}\right] * 0{,}7$$

con la profondità di polimerizzazione (*curing depth*) che è definita come la profondità alla quale l'energia della luce UV, proveniente dal laser, è sufficiente a portare la resina al punto di solidificazione [9]. I valori della potenza del laser e il raggio del fascio laser sono caratteristici della macchina (ottenuti dai *datasheet* delle macchine), mentre quelli della profondità di penetrazione e dell'esposizione critica sono proprietà intrinseche della resina (ottenuti dai *datasheet* dei materiali). Come rivelato da alcuni studi [10], la velocità di scansione reale è il 70% rispetto quella calcolata dalla formula.

Per calcolare la profondità di polimerizzazione è necessario introdurre il termine *overcure* che rappresenta la profondità con la quale ogni tratto di costruzione di uno strato penetra in quello appena sotto; è il motivo principale per il quale gli strati rimangono connessi tra loro una volta solidificati. Solitamente il valore dell'*overcure* viene stimato come il 10÷35% dell'altezza dello strato, così da evitare problemi come quelli di delaminazione (rottura o separazione delle lamine) [9]. In questo studio è stato assunto del 35%.

Il calcolo della profondità di polimerizzazione può essere dunque calcolato come:

$$\text{profondità polimerizzazzione} = \text{altezza strato} + \text{overcure}$$

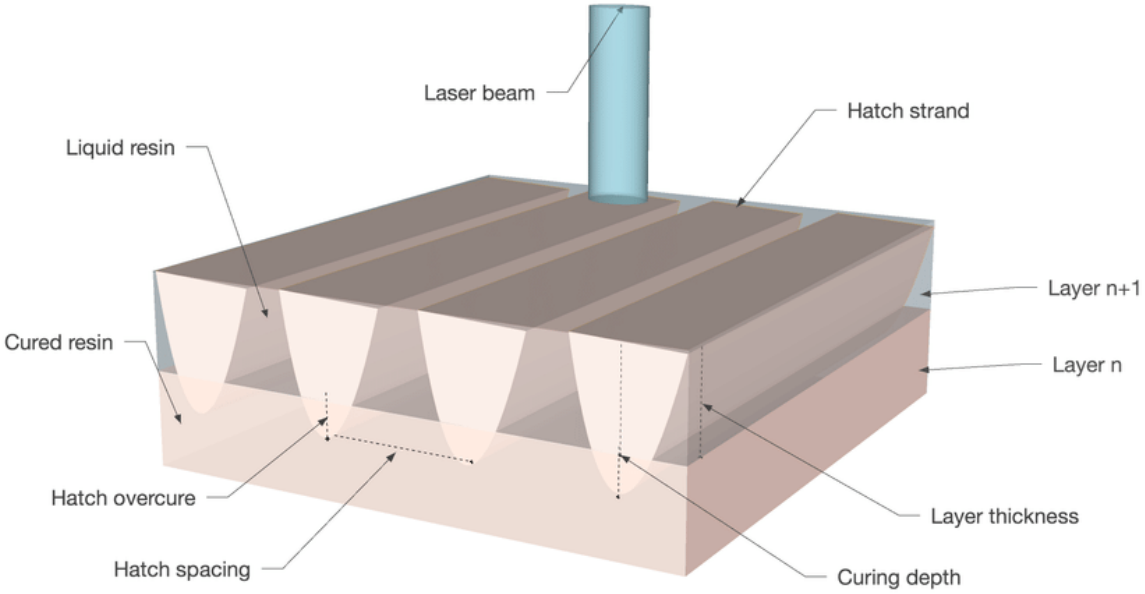

Figura 6: Vista schematica di alcuni parametri della stereolitografia [9]

Nella figura 6 si ha la rappresentazione schematica di:

- Fascio laser (*laser beam*);
- Altezza dello strato (*layer thickness*), strato n-esimo (layer n) e strato n-esimo + 1 (layer n+1);
- Profondità di polimerizzazione (*curing depth*);
- Overcure (*hatch overcure*);
- Tratto di riempimento (*hatch strand*) e spaziatura del tratteggio (*hatch spacing*);
- Resina liquida (*liquid resin*) e resina polimerizzata (*cured resin*).

4.2.1.2 TEMPO DI TRATTEGGIO

Il tempo per attuare il tratteggio interno della parte da costruire [11] è calcolato come:

$$\text{tempo tratteggio} = \frac{\text{volume totale parti}}{\text{altezza strato} * \text{spaziatura} * \text{velocità scansione}}$$

dove viene considerato il volume di tutte le parti che si stampano (esclusi i supporti).

La spaziatura del tratteggio (*hatch spacing o* h_s), che in questo studio è stata considerata di 0,1 mm, è la distanza tra due tratti adiacenti [12].

La modalità di esecuzione del tratteggio è quella del principio di scansione parallelo [8].

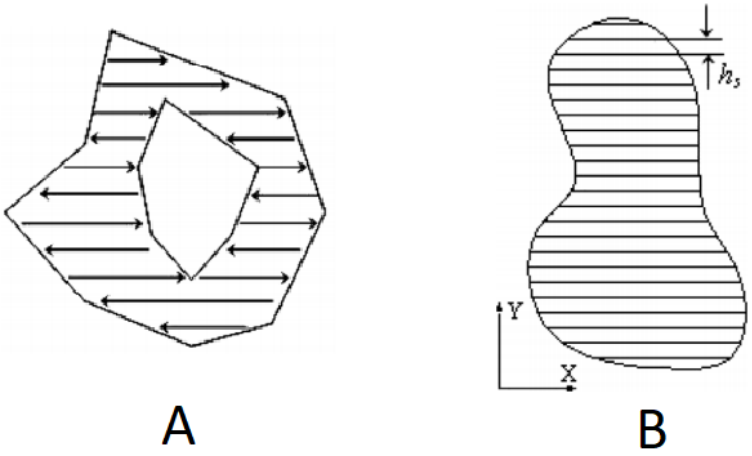

Figura 7: A) Principio di scansione parallelo di una sezione generica; B) Spaziatura di tratteggio [8]

4.2.1.3 TEMPO DI SCANSIONE DEI SUPPORTI

Il tempo totale per la scansione dei supporti [8] è dato da:

$$\text{tempo scansione supporti} = \frac{\text{volume totale supporti}}{\text{altezza strato} * \text{spaziatura} * \text{velocità scansione}}$$

4.2.1.4 TEMPO DI RIPOSIZIONAMENTO

Il tempo di riposizionamento tiene conto del tempo di abbassamento della piastra sulla quale si sta costruendo il pezzo, del tempo richiesto per l'azione del *recoater* (una specie di lama che ha il compito di distribuire uniformemente la resina dopo il completamento di ogni strato) ed i tempi di attesa pre- e post-scansione [8]. In generale viene considerato uguale per ogni strato e può essere quindi calcolato come:

$$\text{tempo riposizionamento} = \text{numero di strati} * \text{singolo tempo riposizionamento}$$

con il singolo tempo di riposizionamento di uno strato che è una caratteristica della stampante. Il numero di strati viene calcolato dividendo l'ingombro in Z delle parti da stampare (considerando anche la distanza dalla piattaforma) per l'altezza del singolo strato:

$$\text{numero strati} = \frac{\text{ingombro Z}}{\text{altezza strato}}$$

4.2.2 CALCOLO DEL COSTO DI COSTRUZIONE

Il calcolo del costo totale della fase di costruzione (*building*) è la somma di:

- Costo della resina
- Costo della macchina
- Costo del lavoratore
- Costo dell'energia

4.2.2.1 COSTO DELLA RESINA

Il costo della resina utilizzata per la stampa è dato da:

$$\text{costo resina} = (1 + \varphi) * \text{costo specifico resina} * \text{densità resina} * \text{volume totale}$$

dove viene utilizzato il volume totale, ovvero la somma tra il volume totale di tutte le parti ed il volume totale di tutti i supporti. φ (≈0,05) rappresenta il coefficiente di materiale perso e tiene conto dello spreco della resina [4].

4.2.2.2 COSTO DELLA MACCHINA

Il costo della macchina per la fase di costruzione è ottenuto moltiplicando il costo orario della macchina, che è una caratteristica della stampante, per il tempo totale di costruzione (dato dalla somma di tempo di scansione del contorno, tempo di tratteggio, tempo di scansione dei supporti, tempo di riposizionamento e tempo di set-up) riportato in ore.

4.2.2.3 COSTO DEL LAVORATORE

Il costo del lavoratore viene calcolato come:

$$\begin{aligned}\text{costo lavoratore} = {} & \text{costo orario lavoratore} \\ & * \{\text{tempo setup} \\ & + [(\text{tempo scansione contorno} + \text{tempo tratteggio} + \text{tempo scansione supporti} \\ & + \text{tempo riposizionamento}) * 0{,}1]\}\end{aligned}$$

con tutti i tempi che sono espressi in ore.

In un caso ideale si assume che il lavoratore sia coinvolto per tutto il tempo di set-up della macchina, che corrisponde al tempo necessario per caricare/scaricare la resina dalla vasca, riscaldare il laser ed eseguire la diagnostica. Per le restanti fasi, invece, non dovrebbe essere richiesta la sua partecipazione [4]; tuttavia, nel seguente modello di costo, si è deciso di considerare che durante questi tempi il lavoratore sia impegnato con altre macchine o supervisioni il processo di stampa, con un impatto del 10%.

4.2.2.4 COSTO DELL'ENERGIA

Considerando che il costo unitario dell'energia corrisponde a 0,2 €/kWh, il costo dell'energia per la fase di costruzione del pezzo è calcolata come:

$$\text{costo energia} = \text{costo unitario energia} * \text{potenza macchina} * \text{tempo di costruzione}$$

con la potenza della macchina espressa in kW ed il tempo di costruzione in ore.

4.2.3 ALTRE INFORMAZIONI

Nel foglio di calcolo della fase di costruzione è stata inserita anche una tabella con la quale si ha un rapido responso sulle compatibilità:

- tra l'ingombro totale delle parti da costruire e le dimensioni della camera di stampa della macchina (dimensioni X, Y, Z e volume);
- tra il peso totale delle parti da stampare e il massimo peso sopportabile dalla macchina;
- tra il materiale scelto e la macchina;
- tra il grado di accuratezza (e quindi l'altezza del singolo strato) e la macchina.

Tabella 16: Tabella delle restrizioni

Restrizioni per la stampa	Responso
Size X	OK
Size Y	Grandezza non supportata
Size Z	Grandezza non supportata
Volume	OK
Weight	OK
Material	Macchina non compatibile
Layer Thickness	OK

4.3 POST-BUILDING

La fase di post costruzione (*post-building*) comprende:

- Lavaggio
- Fotopolimerizzazione post stampa
- Rimozione dei supporti

In questo studio non sono stati considerati altri eventuali processi quali la finitura, verniciatura, ecc...

4.3.1 LAVAGGIO

Il costo della fase di lavaggio (*washing*) è ottenuto dalla somma del costo della macchina, il costo dell'alcol isopropilico ed il costo dell'operaio, mentre il costo dell'energia è stato trascurato in quanto risulta un valore estremamente piccolo.

Il costo della macchina è calcolato analogamente a quello della stampante, ovvero moltiplicando il costo orario della macchina per il tempo di impiego della macchina (tempo di *set-up* e tempo di lavaggio). Lo stesso ragionamento vale per il costo del lavoratore che è:

$$\text{costo lavoratore} = \text{costo orario lavoratore} * [\text{tempo setup} + (\text{tempo lavaggio} * 0{,}1)]$$

dove anche qui si è considerato un peso del 10% per il tempo di lavaggio durante il quale l'operatore non lavora attivamente.

Il costo dell'alcol isopropilico viene calcolato come:

$$\text{costo alcol} = \frac{\text{volume vasca alcol}}{70} * \text{costo specifico alcol}$$

nella quale il volume di alcol contenuto in una vasca viene diviso per 70, cioè per il numero massimo di lavaggi che riesce a compiere prima di esaurirsi del tutto.

I valori usati nella fase di lavaggio sono stati ottenuti dal sito ufficiale dell'azienda fornitrice della macchina (Formlabs) e da [13].

4.3.2 FOTOPOLIMERIZZAZIONE POST STAMPA

Il costo della fase di fotopolimerizzazione post stampa (*curing*) è ottenuto semplicemente dalla somma del costo della macchina ed il costo del lavoratore. Per il costo dell'energia vale lo stesso discorso fatto per la fase di lavaggio, cioè viene trascurato in quanto risulta ininfluente.

Il costo della macchina viene ottenuto anche qui moltiplicando il costo orario della macchina per il tempo di funzionamento della macchina (fase di *set-up* e di polimerizzazione).

Il costo del lavoratore è:

$$\text{costo lavoratore} = \text{costo orario lavoratore} * [\text{tempo setup} + (\text{tempo polimerizzazione} * 0{,}1)]$$

dove valgono le stesse considerazioni fatte per il costo del lavoratore nella fase di lavaggio.
I valori usati sono stati ottenuti dal sito ufficiale dell'azienda fornitrice della macchina (Formlabs) e da [13].

4.3.3 RIMOZIONE DEI SUPPORTI

La rimozione dei supporti è l'ultima fase di post stampa ed è un processo quasi sempre presente, in quanto la creazione dei supporti avviene nella stragrande maggioranza delle stampe. Il calcolo del costo corrisponde al solo costo del lavoratore:

$$\text{costo lavoratore} = \text{tempo rimozione supporti} * \text{costo orario lavoratore}$$

Figura 8: Girante di una turbina con la relativa struttura di supporto
https://www.3dhubs.com/knowledge-base/supports-3d-printing-technology-overview/

5 CASO STUDIO

Il modello di costo realizzato è stato utilizzato per calcolare i costi necessari alla realizzazione di due componenti:

1. Collettore di scarico inferiore
2. Collettore di scarico superiore

Successivamente, questi costi sono stati confrontati con quelli ottenuti da preventivi forniti da diverse aziende di stampa 3D in modo da verificare e validare il modello.

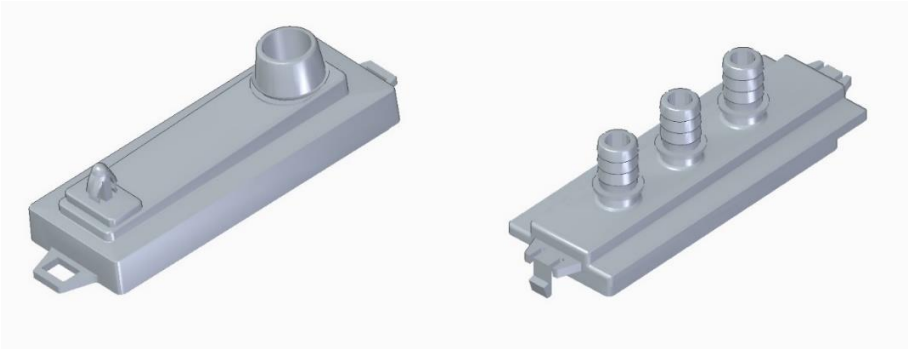

Figura 9: Collettore inferiore (sinistra) e collettore superiore (destra)
Solid Edge

5.1 OTTENIMENTO DEI PARAMETRI

I parametri necessari per calcolare il costo di produzione dei componenti analizzati sono stati ricavati mediante il software AutoDesk NetFabb e sono:

Tabella 17: Parametri dei componenti analizzati

	COLL. INF.	**COLL. SUP.**
Volume della parte	9923,7 mm^3	11239,3 mm^3
Volume della struttura di supporto	21802,5 mm^3	21389,9 mm^3
Superficie della parte	9958,1 mm^2	11536 mm^2
Area orizzontale proiettata nel piano X-Y	4096,84 mm^2	4144,28 mm^2
Altezza della parte (esclusa la distanza dalla piattaforma)	22,7 mm	27,33 mm

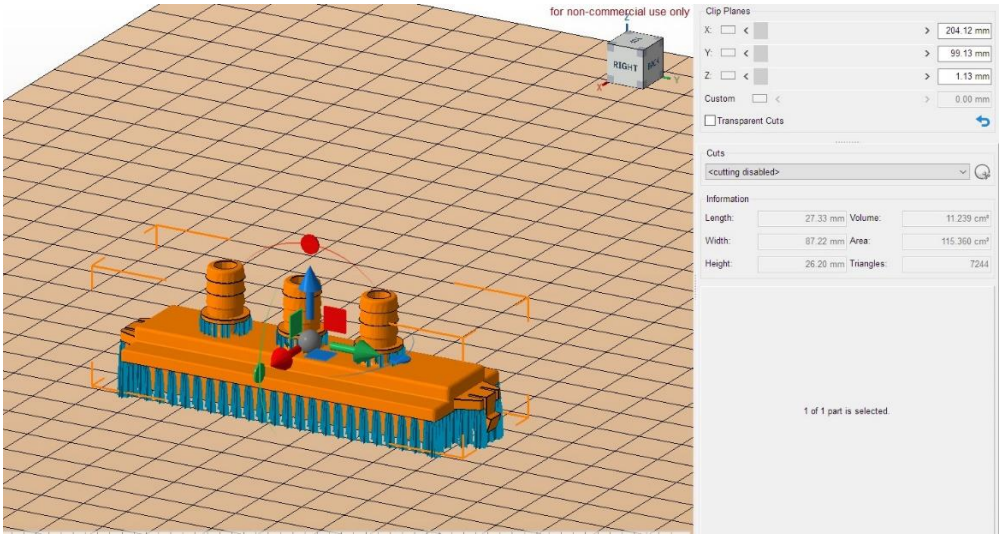

Figura 10: Parametri del collettore superiore

NetFabb

Il numero massimo di parti stampabili contemporaneamente in uno stesso piano è stato ottenuto con NetFabb, per la Stratasys V650 Flex, e con PerForm (software di Formlabs), per la Form2 e la Form3. I dati ricavati sono:

Tabella 18: Numero massimo di parti stampabile in un piano

	COLL. INF.	**COLL. SUP.**	Software utilizzato
Numero parti Stratasys v650 Flex	70	75	NetFabb
Numero parti Form2	5	5	PerForm
Numero parti Form3	5	5	PerForm

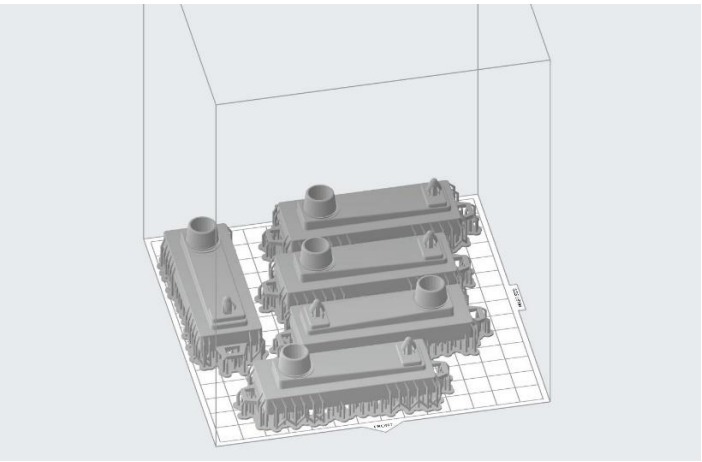

Figura 11: Numero massimo di collettori inferiori nella Form3

PerForm

6 Risultati e discussione

I costi che sono stati calcolati si riferiscono ad una singola parte al variare del numero di parti totali stampate contemporaneamente, che però non supera le 5 unità per la Form3 e le 70 unità per la Stratasys V650 Flex. Tuttavia, i preventivi con i quali devono essere confrontati i costi ricavati dal modello di questa tesi sono riferiti alla stampa di un numero maggiore di parti. Per ovviare a questo problema si ipotizza che il numero massimo di parti stampabili contemporaneamente dalle stampanti sia di 100 unità.

Per evitare un numero di grafici e tabelle eccessivo e ripetitivo, si è deciso di riportare solo una parte dei risultati ottenuti, e sono quelli dati dalla seguente scelta di variabili:

- Macchine: sono state scelte la Form3 e Stratasys V650 Flex, ovvero una stampante desktop ed una industriale. La Form2 non verrà riportata in quanto le sue caratteristiche sono molto simili alla Form3.
- Accuratezza: sono stati riportati i casi nei quali è stato utilizzato il grado di accuratezza medio-alto, in quanto risulta accessibile ad entrambe le macchine.
- Costi: sono stati riportati i costi della sola fase di costruzione della parte, ovvero quella che influenza maggiormente il costo totale [14], e non quelli di post-processo (questa scelta è data dal fatto che anche i preventivi ottenuti si riferiscono al costo di questa sola fase).

I preventivi sono stati ottenuti dai siti di 3D Hubs e Xometry.

6.1 RISULTATI OTTENUTI

Nel seguente paragrafo saranno riportate le tabelle con i costi dei collettori:

- ricavati dal modello sviluppato in questo studio;
- ottenuti dai siti online di stampa 3D.

6.1.1 COLLETTORE DI SCARICO INFERIORE

I costi di costruzione del collettore di scarico inferiore per le diverse macchine ricavati dal modello di costo sviluppato sono:

Tabella 19: Costi di costruzione del collettore inferiore con Form3

Form3 (coll. inf.)	ABS-like	PP-like
1	25,82 €	22,88 €
2	17,43 €	14,49 €
5	12,39 €	9,45 €
10	10,71 €	7,77 €
50	9,37 €	6,43 €
100	9,20 €	6,26 €

Tabella 20: Costi di costruzione del collettore inferiore con Stratasys V650 Flex

Stratasys V650 Flex (coll. inf.)	ABS-like	PP-like	PC-like
1	41,03 €	38,24 €	51,57 €
2	25,29 €	22,51 €	35,83 €
5	15,85 €	13,06 €	26,39 €
10	12,70 €	9,92 €	23,24 €
50	10,18 €	7,40 €	20,72 €
100	9,87 €	7,08 €	20,41 €

I costi ottenuti dai preventivi di 3D Hubs e Xometry sono rispettivamente:

Tabella 21: Costi di costruzione di 3D Hubs per il collettore inferiore

3D HUBS (coll. inf.)	ABS-like		PP-like		PC-like
	tough 2000	accura xtreme white 200	accura 25	durable resin	accura 60
1	25,75 €	108,83 €	86,80 €	27,64 €	88,07 €
2	20,20 €	73,30 €	61,08 €	21,62 €	61,38 €
5	15,02 €	47,61 €	40,88 €	16,24 €	41,29 €
10	12,47 €	37,65 €	32,98 €	13,58 €	33,35 €
50	8,93 €	26,70 €	23,73 €	9,70 €	24,29 €
100	7,88 €	23,94 €	20,91 €	8,53 €	21,47 €

Tabella 22: Costi di costruzione di Xometry per il collettore inferiore

Xometry (coll. inf.)	ABS-like			PP-like	PC-like		
	accura abs black (sl 7820)	accura xtreme white 200	somos watershed xc 11122	accura 25	accura 60	somos perform	accura clearvue
1	44,23 €	49,15 €	39,76 €	39,98 €	39,82 €	49,15 €	41,08 €
2	37,51 €	41,21 €	33,40 €	33,53 €	33,43 €	41,21 €	34,68 €
5	30,32 €	32,32 €	26,79 €	26,80 €	26,80 €	32,31 €	27,99 €
10	27,05 €	28,27 €	23,82 €	23,80 €	23,83 €	28,27 €	24,98 €
50	24,67 €	25,43 €	21,86 €	21,84 €	21,89 €	25,42 €	22,94 €
100	24,67 €	25,43 €	21,86 €	21,84 €	21,89 €	25,42 €	22,94 €

La media dei valori preventivati è stata riportata nella tabella sottostante:

Tabella 23: Media dei costi di costruzione del collettore inferiore

COLLETTORE INFERIORE	ABS-like	PP-like	PC-like
1	53,54 €	51,47 €	54,53 €
2	41,12 €	38,74 €	42,68 €
5	30,41 €	27,97 €	32,10 €
10	25,85 €	23,45 €	27,61 €
50	21,52 €	18,42 €	23,64 €
100	20,76 €	17,09 €	22,93 €

6.1.2 COLLETTORE DI SCARICO SUPERIORE

I costi di costruzione del collettore di scarico superiore per le diverse macchine, ricavati dal modello di costo sviluppato, sono:

Tabella 24: Costi di costruzione del collettore superiore con Form3

Form3 (coll. sup.)	ABS-like	PP-like
1	26,35 €	23,32 €
2	17,82 €	14,80 €
5	12,70 €	9,68 €
10	11,00 €	7,97 €
50	9,63 €	6,61 €
100	9,46 €	6,44 €

Tabella 25: Costi di costruzione del collettore superiore con Stratasys V650 Flex

Stratasys V650 Flex (coll. sup.)	ABS-like	PP-like	PC-like
1	42,75 €	39,89 €	53,59 €
2	26,29 €	23,43 €	37,13 €
5	16,42 €	13,55 €	27,26 €
10	13,12 €	10,26 €	23,96 €
50	10,49 €	7,63 €	21,33 €
100	10,16 €	7,30 €	21,00 €

I costi ottenuti dai preventivi di 3D Hubs e Xometry sono rispettivamente:

Tabella 26: Costi di costruzione di 3D Hubs per il collettore superiore

3D HUBS (coll. sup.)	ABS-like		PP-like		PC-like
	tough 2000	accura xtreme white 200	accura 25	durable resin	accura 60
1	28,18 €	117,72 €	94,29 €	30,20 €	95,51 €
2	22,08 €	78,76 €	65,99 €	23,62 €	66,10 €
5	16,46 €	51,18 €	44,05 €	17,79 €	44,41 €
10	13,70 €	40,44 €	35,53 €	14,91 €	35,81 €
50	9,87 €	28,75 €	25,57 €	10,71 €	26,14 €
100	8,72 €	25,72 €	22,54 €	9,41 €	23,15 €

Tabella 27: Costi di costruzione di Xometry per il collettore superiore

Xometry (coll. sup.)	ABS-like			PP-like	PC-like		
	accura abs black sl 7820	accura xtreme white 200	somos watershed xc 11122	accura 25	accura 60	somos perform	accura clearvue
1	45,51 €	50,53 €	40,84 €	41,04 €	40,89 €	50,53 €	42,20 €
2	38,82 €	42,64 €	34,50 €	34,63 €	34,54 €	42,64 €	35,84 €
5	31,66 €	33,77 €	27,91 €	27,93 €	27,93 €	33,77 €	29,17 €
10	28,49 €	29,82 €	25,07 €	25,04 €	25,07 €	29,82 €	26,27 €
50	26,04 €	26,87 €	23,06 €	23,03 €	23,09 €	26,87 €	24,19 €
100	26,04 €	26,87 €	23,06 €	23,03 €	23,09 €	26,87 €	24,19 €

La media dei valori preventivati è stata riportata nella tabella sottostante:

Tabella 28: Media dei costi di costruzione del collettore superiore

COLLETTORE SUPERIORE	ABS-like	PP-like	PC-like
1	56,56 €	55,18 €	57,28 €
2	43,36 €	41,41 €	44,78 €
5	32,20 €	29,92 €	33,82 €
10	27,50 €	25,16 €	29,24 €
50	22,92 €	19,77 €	25,07 €
100	22,08 €	18,33 €	24,33 €

6.2 DISCUSSIONE DEI RISULTATI

Dal confronto tra i costi ricavati dal modello di costo e quelli ottenuti dai preventivi online si sono riscontrati i seguenti margini d'errore:

- del 50÷65% per il collettore inferiore e del 55÷70% di quello superiore, se si utilizza la Form3;
- del 25÷60% sia per il collettore inferiore che per quello superiore, se si utilizza la Stratasys V650 Flex.

con il margine di errore minore che si ha sempre quando si stampa un singolo componente.

La minore deviazione del costo è stata individuata per il caso in cui la resina impiegata è il PC-like, infatti l'errore oscilla tra il 5÷20%.

L'andamento degli errori per il collettore inferiore (quelli del collettore superiore sono simili) è riportato nei seguenti grafici:

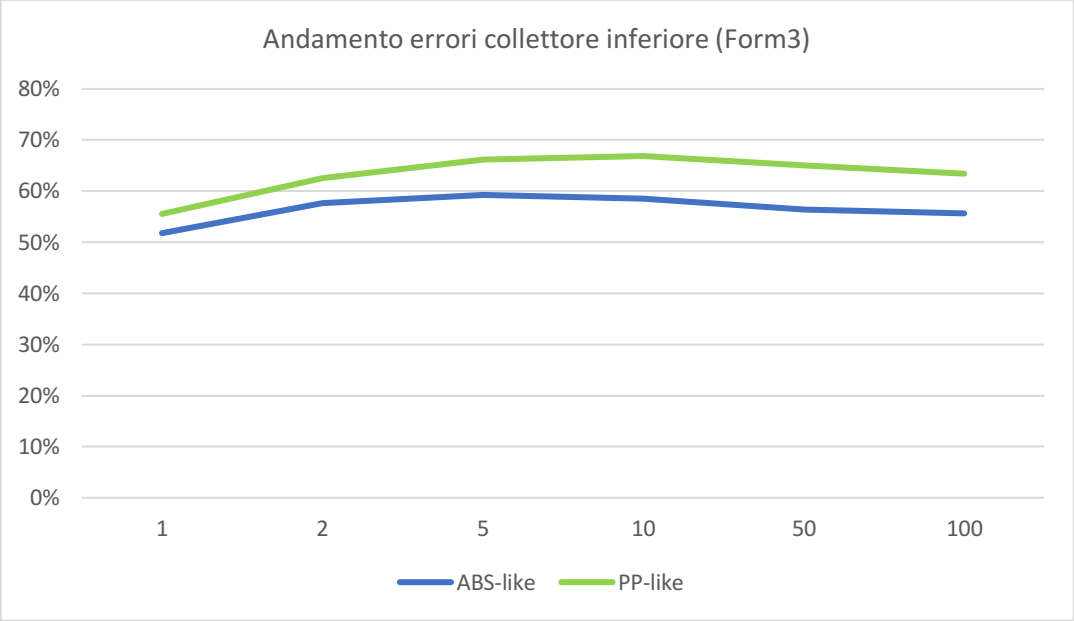

Figura 12: Andamento del margine di errore tra i costi dei preventivi ed il modello di costo per la realizzazione del collettore inferiore con la Form3 (accuratezza medio-alta)

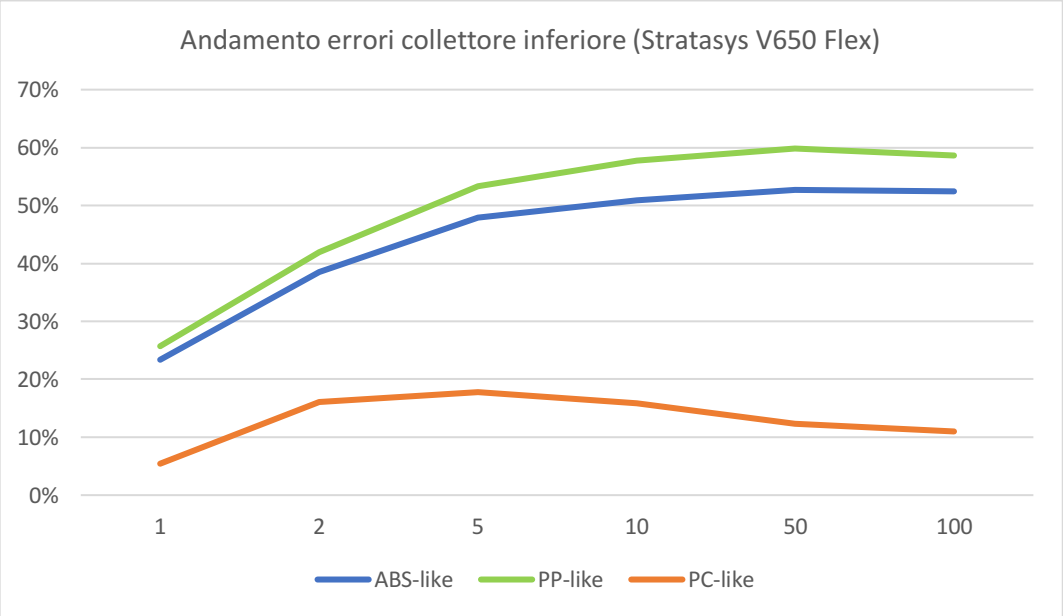

Figura 13:Andamento del margine di errore tra i costi dei preventivi ed il modello di costo per la realizzazione del collettore inferiore con la Stratasys V650 Flex (accuratezza medio-alta)

Una possibile spiegazione dei seguenti risultati può essere il fatto che il modello di costo sviluppato in questa tesi cerchi di raggruppare tre famiglie di resine nelle quali i costi sono stati ottenuti come media dei costi delle singole resine. Tuttavia, dalle tabelle 10, 11 e 12 si può notare che questi non sono tutti riportati e addirittura che in una stessa famiglia siano presenti costi abbastanza diversi da loro (questo è comprensibile in quanto dipende dagli standard delle aziende produttrici che possono produrre resine di maggiore qualità).

Un'altra causa della deviazione tra i costi calcolati e quelli ottenuti dal preventivo può essere che i siti dai quali sono stati richiesti quest'ultimi non permettono di scegliere i parametri di stampa della parte, come ad esempio la distanza del pezzo dalla piastra di costruzione o la stampante utilizzata per il processo.

6.3 ALTRE CONSIDERAZIONI

In questo paragrafo verranno mostrati alcuni grafici che mostrano l'andamento dei costi al variare di alcuni parametri. Per limitare il numero di grafici, verranno inseriti solo quelli riferiti al collettore inferiore (quelli del collettore superiore sono molto simili).

6.3.1 ANDAMENTO DEL COSTO AL VARIARE DELLA RESINA

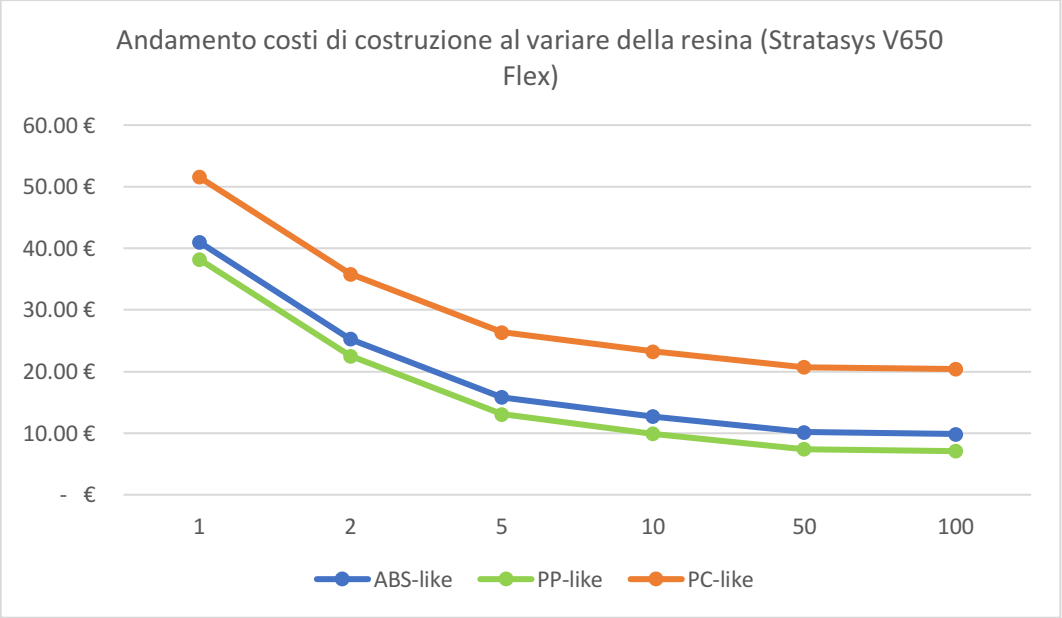

Figura 14: Andamento del costo di costruzione del collettore inferiore al variare della resina utilizzata con Stratasys V650 Flex (accuratezza medio-alta)

Per rappresentare al meglio l'andamento del costo di costruzione al variare della resina è stato riportato il grafico ottenuto con l'utilizzo della stampante Stratasys V650 Flex in quanto tutte e tre le famiglie di resine risultano compatibili con essa.

La famiglia di resine PC-like risulta la più costosa.

6.3.2 ANDAMENTO DEL COSTO AL VARIARE DEL GRADO DI ACCURATEZZA

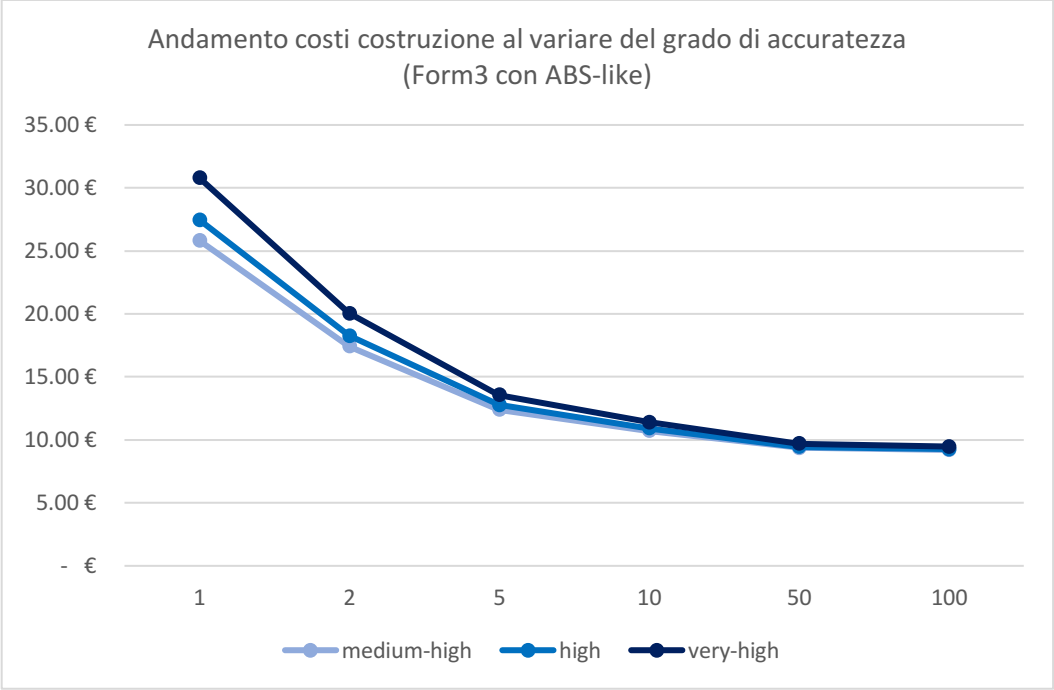

Figura 15: Andamento del costo di costruzione del collettore inferiore al variare del grado di accuratezza utilizzata con Form3 (ex. ABS-like)

L'andamento del costo di costruzione al variare del grado di accuratezza è stato individuato utilizzando la Form3 (in quanto è in grado di stampare con tutti i gradi) e utilizzando la famiglia di resine ABS-like come campione.

Dal grafico si può vedere che il costo aumenta all'aumentare dell'accuratezza usata, infatti con un grado di accuratezza maggiore si ha l'aumento degli strati da stampare per creare la parte, quindi anche l'aumento dei tempi di costruzione che influenzano direttamente il costo. La differenza di costo tra le diverse accuratezze è massima quando si stampa una sola parte e diminuisce al crescere del numero di parti totali stampate.

6.3.3 COSTI CHE CONTRIBUISCONO ALLA COSTRUZIONE DEL PEZZO

Come già detto, il costo della fase di costruzione è dato dalla somma dei costi della resina (materiale), della macchina, del lavoratore e dell'energia. Gli andamenti di questi costi al variare del numero di parti da stampare sono riportati sui grafici sottostanti, nei quali si è considerato di utilizzare resine ABS-like con accuratezza medio-alta.

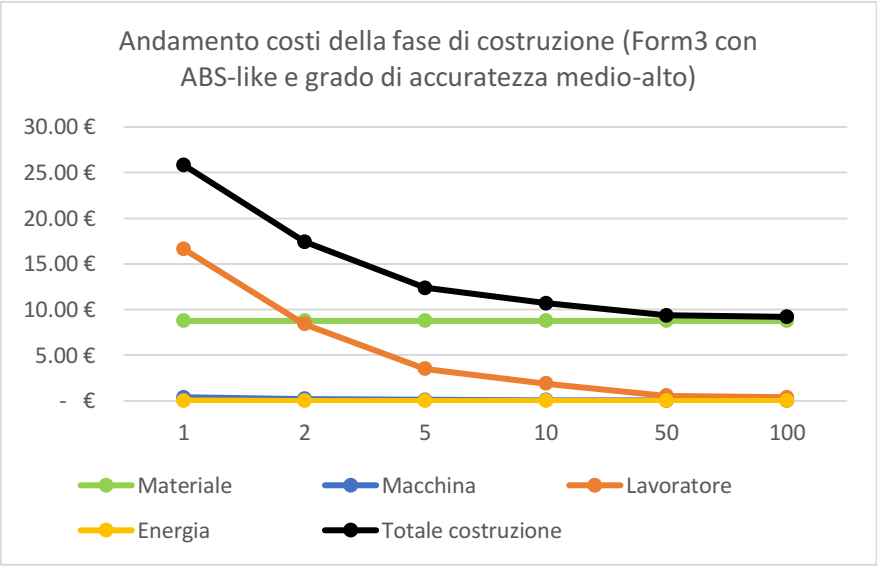

Figura 16: Andamento dei costi della fase di costruzione al variare del numero di parti stampate con Form3 (ex. ABS-like e grado di accuratezza medio-alto)

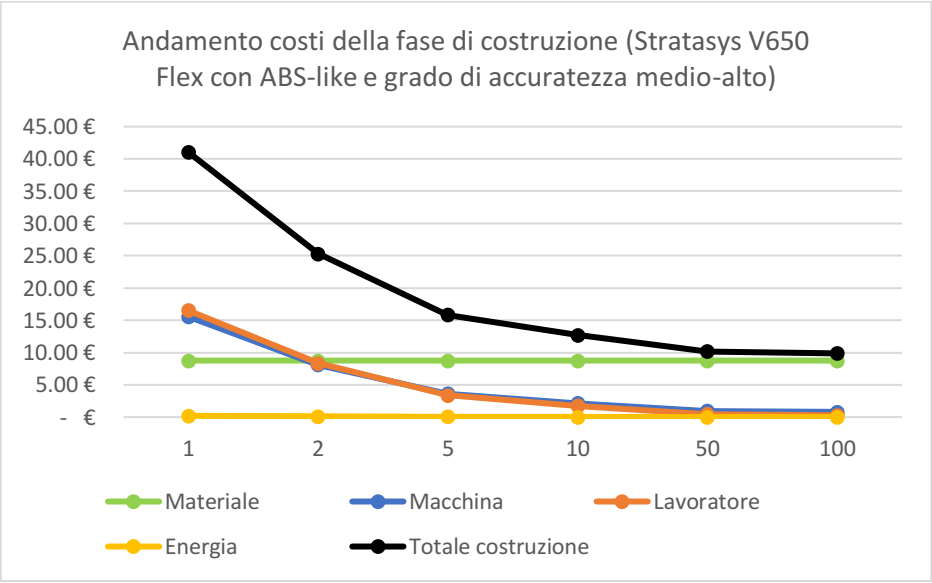

Figura 17: Andamento dei costi della fase di costruzione al variare del numero di parti stampate con Stratasys V650 Flex (ex. ABS-like e grado di accuratezza medio-alto)

La differenza sostanziale tra le due tipologie di stampanti è il fatto che nella Form3 (desktop) il costo della macchina è molto basso, mentre nella Stratasys V650 Flex (industriale) è molto più elevato. Questo diverso comportamento risulta ancora più evidente se si analizzano i diagrammi sotto riportati che mostrano il peso dei diversi costi della fase di costruzione sul costo totale di costruzione riferito alla stampa di una sola parte:

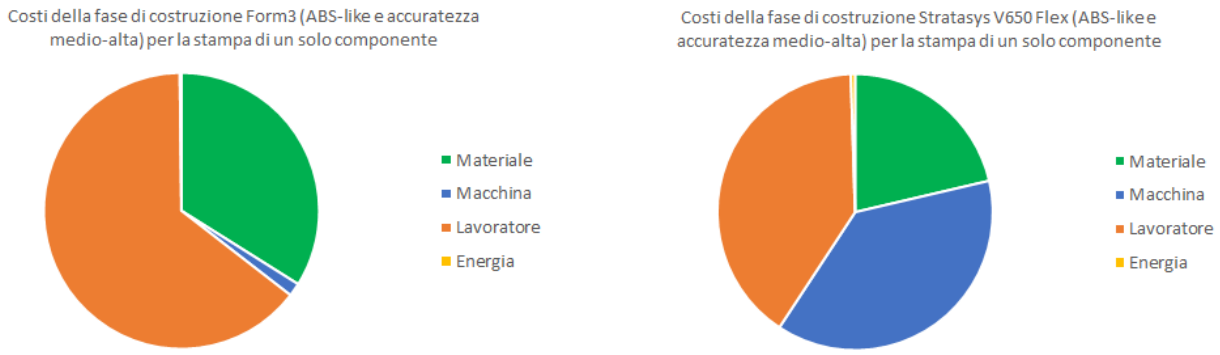

Figura 18: Influenza dei diversi costi della fase di costruzione per Form3 (sinistra) e Stratasys V650 Form (destra) (ex. ABS-like e grado di accuratezza medio-alto)

La spiegazione di tale comportamento può essere riconducibile al fatto che Stratasys V650 Flex abbia una potenza circa 5 volte quella della Form3.

6.3.4 COSTO TOTALE DELLA PRODUZIONE DI UNA PARTE

È stato riportato anche il diagramma che mostra l'influenza dei costi delle operazioni di post-stampa, nel caso cui fossero presenti, sul costo totale di produzione di una parte:

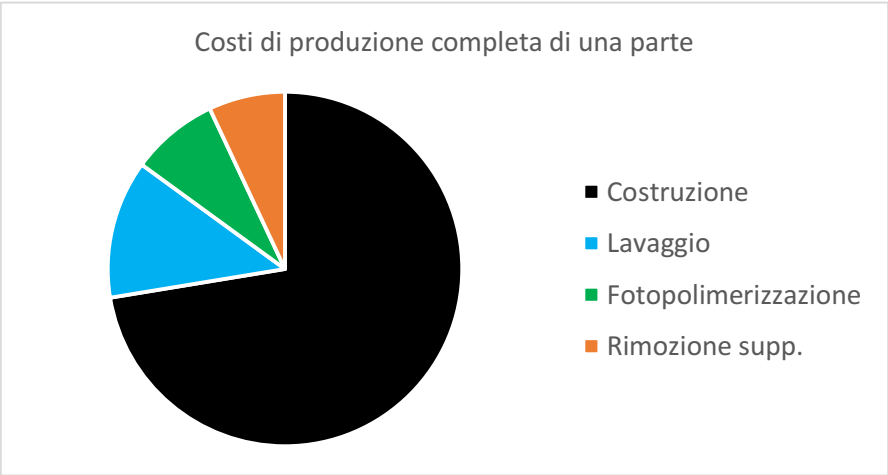

Figura 19: Costi che influiscono sulla produzione di una parte da stereolitografia

6.4 IL PROBLEMA DELLA SOVRAPPOSIZIONE DELLE PARTI

Nel presente studio è stato considerato di stampare le parti in un solo piano di stampa, ovvero non sovrapponendo le parti una sopra l'altra ma affiancandole. Questa scelta è stata effettuata in quanto si è visto che stampando su più piani, il costo di una singola parte aumenta al posto di diminuire. La causa di questa crescita del prezzo è che quando si aumentano i piani di stampa, tra di questi vengono create delle strutture di supporto verticali che hanno un volume maggiore rispetto alle stesse parti da sostenere.

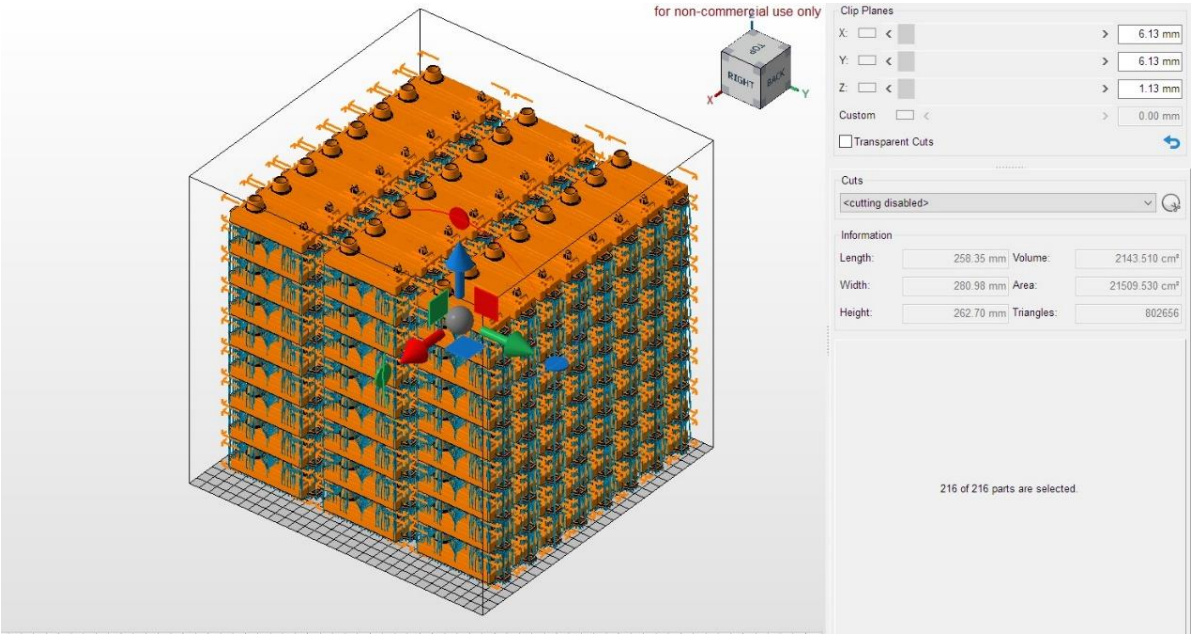

Figura 20: Creazione di un numero elevato di parti su più piani di stampa NetFabb

7 CONCLUSIONI

In questa tesi si è sviluppato un modello di costo per il processo di stereolitografia con lo scopo di ottenere una stima, il più possibile precisa, dei costi di produzione di un componente. Questi sono stati successivamente confrontati con quelli ottenuti dai vari siti di stampa 3D presenti online.

Per la realizzazione del modello di costo sono stati analizzati diversi materiali presenti nel mercato, in seguito sono stati raggruppati in tre famiglie (ABS-like, PP-like, PC-like) in base alle loro caratteristiche chimiche e meccaniche. Il costo delle resine PC-like risulta generalmente più elevato rispetto alle altre due.

Le macchine prese in considerazione sono la Form2 e la Form3, di tipologia desktop, e la Stratasys V650 Flex, di tipo industriale. Le prime mostrano un vantaggio, in termini di costi, se vengono adottate per la stampa di poche parti. Per la produzione di lotti da un elevato numero di componenti, invece, sono consigliabili quelle industriali che sono dotate di un volume di stampa molto maggiore.

I risultati ottenuti dall'analisi di due collettori mostrano l'andamento del costo al variare del materiale, della macchina e dell'accuratezza scelta come parametro di costruzione. All'aumentare dell'accuratezza, si ha un aumento di tempi di costruzione del pezzo e quindi anche del costo di produzione, in quanto diminuisce lo spessore di ogni singolo strato che deve essere creato per stampare il componente finale.

La comparazione dei risultati ottenuti dal modello di costo e quelli dei siti di stampa 3D presenta dei discostamenti del prezzo. C'è da considerare il fatto che i preventivi presi dai siti non specificano alcuni parametri influenti alla realizzazione delle parti, come ad esempio il tipo di macchina utilizzata, il grado di accuratezza o la distanza tra il pezzo e la piastra di costruzione, inoltre non considerano il numero massimo di parti stampabili con una singola macchina. In futuro, una ricerca più incentrata sui prezzi di ogni singola resina (contattando direttamente i fornitori o le aziende produttrici) potrebbe portare ad una stima più precisa del costo medio delle diverse famiglie di resine, il quale risulta il valore che più influenza il discostamento tra i valori ottenuti dal modello e quelli dei preventivi online.

8 BIBLIOGRAFIA

[1] [1] [2] T. Hagiwara, «Recent progress of photo-resin for rapid prototyping, “resin for stereolithography”,» *Macromolecular Symposia,* vol. 175, n. 1, pp. 397-402, 2001.

[3] [2] [4] M. Mele, G. Campana e G. D'Avino, «Life cycle impact assessment of desktop stereolithography,» *Journal of Cleaner Production,* vol. 244, 2020.

[5] [3] [6] M. Ruffo, C. Tuck e R. Hague, «Cost estimation for rapid manufacturing - laser sintering production for low to medium volumes,» vol. 220, n. 9, pp. 1417-1427, 2006.

[7] [4] [8] Y. Yang e L. Li, «Cost modeling and analysis for Mask Image Projection Stereolithography additive manufacturing: Simultaneous production with mixed geometries,» *International Journal of Production Economics,* vol. 206, pp. 146-158, 2018.

[9] [5] [10] P. F. Jacobs, «Fundamentals of Stereolithography,» *1992 International Solid Freeform Fabrication Symposium,* 1992.

[11] [6] [12] P. Alexander, S. Allen e D. Dutta, «Part orientation and build cost determination in layered manufacturing,» *Computer-Aided Design,* vol. 30, n. 5, pp. 343-356, 1998.

[13] [7] [14] N. Hopkinson e P. Dicknes, «Analysis of rapid manufacturing—using layer manufacturing processes for production,» vol. 217, n. 1, pp. 31-39, 2003.

[15] [8] [16] H. Lan e Y. Ding, «Price quotation methodology for stereolithography parts based on STL model,» *Computers & Industrial Engineering,* vol. 52, n. 2, pp. 241-256, 2007.

[17] [9] [18] S. Zakeri, M. Vippola e E. Levänen, «A comprehensive review of the photopolymerization of ceramic resins used in stereolithography,» *Additive Manufacturing,* vol. 35, 2020.

[19] [10] [20] C. C. Chen e P. A. Sullivan, «Predicting total build-time and the resultant cure depth of the 3D stereolithography process,» *Rapid Prototyping Journal,* vol. 2, n. 4, pp. 27-40, 1996.

[21] [11] [22] I. Campbell, J. Combrinck, D. de Beer e L. Bernard, «Stereolithography build time estimation based on volumetric calculations,» *Rapid Prototyping Journal,* vol. 14, n. 5, pp. 271-279, 2008.

[23] [12] [24] E. R. Khorasani e H. Baseri, «Determination of optimum SLA process parameters of H-shaped parts,» *J Mech Sci Technol,* vol. 27, pp. 857-863, 2013.

[25] [13] [26] L. Mazzanti, *Tesi di Luca Mazzanti - Analisi delle tecnologie di Additive Manufacturing per la produzione in serie,* Università Politecnica delle Marche, 2020.

[27] [14] [28] H. Lan, Y. Ding, J. Hong, H. Huang e B. Lu, «Web-based quotation system for stereolithography parts,» *Computers in Industry,* vol. 59, n. 8, pp. 777-785, 2008.