



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in **Ingegneria Meccanica**

**STUDIO E SVILUPPO DI MODELLI DI COSTO PER LA
PREVENTIVAZIONE DI COMPONENTI REALIZZATI
IN FUSED DEPOSITION MODELING (FDM)**

**STUDY AND DEVELOPMENT OF COST MODELS FOR
THE ESTIMATION OF COMPONENTS MADE IN
FUSED DEPOSITION MODELING (FDM)**

Relatore:

Dott. Ing. **Marco Mandolini**

Correlatrice:

Dott.ssa **Federica Santucci**

Tesi di:

Endrius Ndreka

I. Indice

I. Indice	ii
1 Introduzione e ceni storici	4
2 Il processo di stampa	6
2.1 I parametri di stampa	7
2.1.1 Materiale	7
2.1.2 Materiale di supporto	9
2.1.3 Velocità di stampa	10
2.1.4 Altezza strato	10
2.1.5 Ampiezza pista	10
2.1.6 Macchina	11
3 Procedimento	12
3.1 Utilizzo di parole chiave e fonti di informazione	12
3.2 Metodo di esecuzione	13
3.3 Banche dati	13
3.3.1 Database Macchine	14
3.3.2 Database Materiali	16
3.3.3 Database energia e parametri di stampa	17
4 Modello di costo	18
4.1 Caratteristiche componente	18
4.2 Build	19
4.2.1 Restrizioni	19
4.2.2 Tempi di processo	19
4.2.3 Materia prima	20
4.2.4 Energia elettrica	21
4.2.5 Macchina	21
4.2.6 Operatore	22
4.3 Riepilogo	22
4.4 Ripartizione tempi e costi	23
5 Caso studio	24
5.1 Valori preliminari	24
5.2 Risultati collettore inferiore	26

5.2.1 Stampante desktop - Accuratezza alta _____	26
5.2.2 Stampante industriale - Accuratezza alta _____	27
5.3 Risultati collettore superiore _____	28
5.3.1 Stampante desktop - Accuratezza alta _____	28
5.3.2 Stampante industriale - Accuratezza alta _____	29
5.4 Comparazioni _____	30
5.4.1 Prezzi online _____	30
5.4.2 Operatore durante la costruzione _____	31
5.4.3 Condizioni di massimo _____	32
6 Conclusione e considerazioni _____	34
7 Riferimenti _____	36

1 Introduzione e ceni storici

La tecnologia di Produzione Additiva (*Additive Manufacturing*) è una tecnica che si contrappone a quella tradizionale della Produzione Sottrattiva. I principali vantaggi sono quelli di non avere bisogno di più macchine per produrre un manufatto e la riduzione del materiale usato che, nella produzione sottrattiva, è importante. L'invenzione di questa tecnologia risale al 1981 con lo sviluppo, da parte di Hideo Kodama, della SLA, anche se già dagli anni 60 ci furono i primi tentativi. Dopo tale data si sono susseguite altre tecnologie, tra le quali FDM, SLS, DMLS e SLM. La grande espansione della AM è avvenuta solamente nei primi anni 2000 con l'introduzione delle macchine desktop e la possibilità di accesso alla tecnologia anche da parte degli utenti, invece che solamente delle aziende. La tecnologia che verrà trattata in questa tesi è quella del FDM (o FFF genericamente).

La Fused Deposition Modeling è una tecnica sviluppata e brevettata tra la fine degli anni 80 e l'inizio degli anni 90 dalla Stratasys Inc. Con la scadenza del brevetto si è arrivati all'ingresso nel mercato di altri produttori e questo ne ha aumentato la popolarità.

L'FDM funziona grazie ad un ugello caldo che, muovendosi attraverso motori passo-passo nel volume di stampa, estrude il filamento di materiale. La testina, depositando il materiale su strati che possono essere di varie altezze, va a creare man mano il modello. La base del manufatto poggia su una piastra, che può essere riscaldata, e ha la funzione di permettere lo sviluppo verticale del modello.

L'Obiettivo ultimo di questa tesi è quello di andare a sviluppare un modello di costo che, in base alla macchina, al materiale, al numero di pezzi e alla accuratezza voluta, andrà a definire un tempo e un corso per la creazione dell'oggetto. Successivamente si andrà a verificare che i prezzi trovati siano in linea con quello dei servizi di stampa online e, nel caso vi siano discrepanze, individuare il motivo delle stesse. Tutto questo verrà fatto prendendo come *case study* i 2 modelli "Collettore inferiore" e "Collettore superiore" facenti parte di una macchina del caffè professionale.

Lo sviluppo del modello di costo è stato fatto ricercando la bibliografia in merito ed attingendo sia ai giornali con pubblicazione scientifiche che ai siti dei produttori di macchine e materiali con vari i vari datasheet.

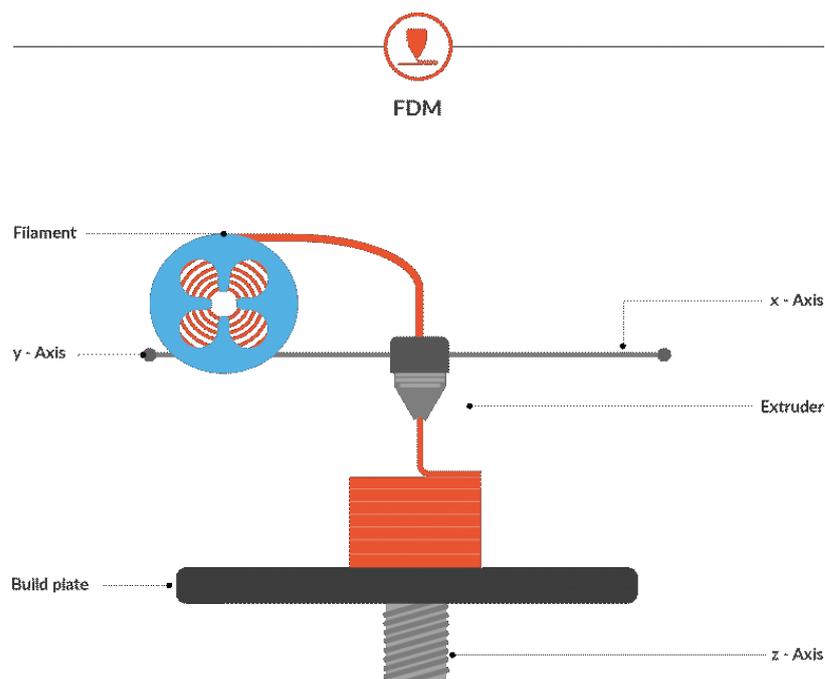


Figura 1: Funzionamento FDM

(<https://druckwege.de/en/home-en/technology/fused-deposition-modelling-fdm>)

2 Il processo di stampa

La produzione tramite FDM avviene con una stampante dotata di una testina calda che lavora il materiale. Il filamento, che è raccolto in bobine, è tirato e fuso all'interno dell'ugello per poi essere depositato strato dopo strato per creare il modello. I vari materiali che possono essere usati dipendono da che tipo di macchina si sta usando. L'elemento centrale di tutto il processo è la cosiddetta testina (*nozzle*), un estrusore che può variare in materiale e in grandezza. Il supporto che tiene il pezzo in lavorazione è un piatto movente in altezza z , il quale può essere freddo o riscaldato fino a temperature di 110° , che ha lo scopo di permettere la creazione dei vari strati impilati uno sull'altro. Il motivo del riscaldamento del piatto, che generalmente non c'è nelle macchine di fascia molto bassa, è evitare la ritrazione del materiale appena depositato. Un altro modo per evitare questi difetti è quello di stampare uno strato *di sacrificio* iniziale su cui verrà creato il pezzo finale. Il secondo metodo è usato per le stampanti senza preriscaldamento.

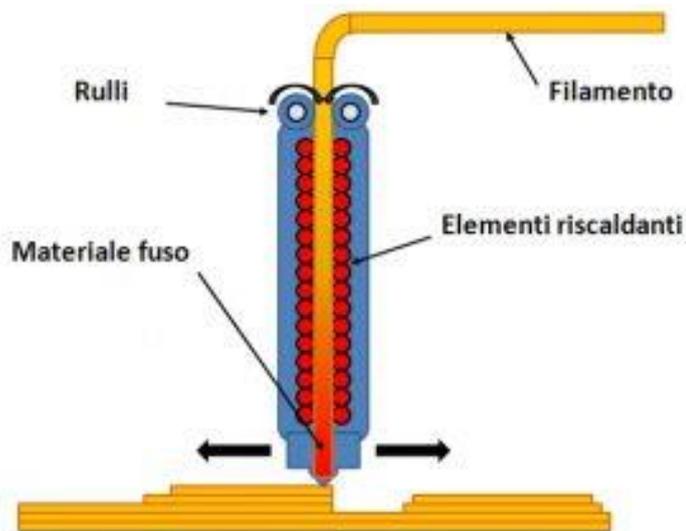


Figura 2: Funzionamento dell'ugello estrusore

2.1 I parametri di stampa

2.1.1 Materiale

La scelta del materiale è influenzata dalla macchina usata e dallo scopo finale del pezzo che si realizza. I materiali che sono stati trattati in questa tesi sono:

- **ABS**: una termoplastica dura che può essere usata per pezzi durevoli e prototipi. Ha lo svantaggio di rilasciare fumi dannosi durante la stampa (*i lego sono in ABS*)
- **PLA**: è una bioplastica ricavata dall'amido di mais. Ha il vantaggio di essere biodegradabile e quindi attossico per l'ambiente, tuttavia questo fa sì che non possa essere usato per pezzi che devono durare.
- **ASA**: resistente alle intemperie climatiche
- **Nylon**: per parti che durevoli e che devono supportare fatica
- **PETG**: usato per pezzi di grandi dimensioni e flessibili
- **TPU**: presenta alta flessibilità ed elasticità (*le cover dei telefoni sono in TPU*)

Questi sopra-riportati sono solo alcuni dei materiali più comunemente usati, sia dalle macchine desktop che da quelle professionali. Vi è inoltre la possibilità di stampare materiali come il metallo e il legno. Naturalmente la stampa di questi materiali speciali richiede che il filo sia un composto contenente tracce di essi al suo interno e vengono utilizzati ugelli più grandi del normale. Altra caratteristica è che dopo la stampa vi è la necessità di processi di post-produzione, come la messa in forno, per eliminare il composto su cui il materiale è disperso. Alcune aziende come la Stratasys Inc. producono materiali proprietari, ad esempio Ultem 1010 e Ultem 9085, che sono ideati per pezzi che necessitano di elevata resistenza termica e chimica.



Figura 3: Staffa realizzata in Nylon

(<https://www.technimoldsistemi.com/prodotto/fdm-nylon-6/>)



Figura 4: Turbina e Filamento in Ultem

1010

2.1.2 Materiale di supporto

Un punto cruciale della stampa 3d è quello dei supporti. I supporti sono ramificazioni di materiale usato per sostenere tutte quelle parti che hanno bisogno di essere stampate senza che ci sia uno strato solido su cui poggiare. Gli angoli su cui si rendono necessari questi dipende dal tipo di materiale, dall'altezza e ampiezza di stampa, oltre che al materiale in sé; generalmente si è nel range di 40°-50° rispetto l'asse verticale. La densità e la forma possono essere decise direttamente sul programma che si usa per generarli, le forme più comuni sono a colonne e ad albero. Il secondo metodo, che è anche il più recente, ha il vantaggio di usare meno materiale e questo permette di ridurre i tempi, il materiale ed aumenta la facilità della loro rimozione. Altro vantaggio dei supporti è che possono anche essere usati per impilare più pezzi nella stessa stampa. Nella realizzazione di questi bisogna stare attenti a far sì che il loro asporto venga reso il più semplice possibile, in quanto durante l'eliminazione si potrebbe danneggiare il modello. Per la loro creazione si può usare lo stesso materiale della stampa (questa è la soluzione delle macchine economiche) o uno diverso. La stampa del supporto con materiale diverso da quello principale ha il vantaggio di permettere l'uso di materiali solubili, cioè che si possono sciogliere in acqua o altre soluzioni (questo riduce di molto i tempi di rimozione, oltre che i rischi).



Figura 3: ST-130 Materiale solubile

2.1.3 Velocità di stampa

La velocità di stampa è la misura con cui si sposta l'ugello nel piano X-Y durante la fase di estrusione. Maggiore è il valore di questo dato e minore è il tempo di costruzione. I range di velocità variano in base al materiale e vanno da circa 20 mm/s a più di 100 mm/s, anche se ve n'è una consigliata per ognuno di essi. La velocità influenza anche la resistenza meccanica [1] [2], più piccola è la velocità e più questa sarà maggiore.

2.1.4 Altezza strato

L'altezza di ciascun strato stampato è un altro parametro che influenza il tempo di stampa e la resistenza meccanica [3] [4], oltre che la qualità della lavorazione [5]. I vari valori che solitamente assume il *layer thickness* sono solitamente 0,1 - 0,15 - 0,20 - 0,25 - 0,30 mm [4] anche se può essere maggiore di questi.

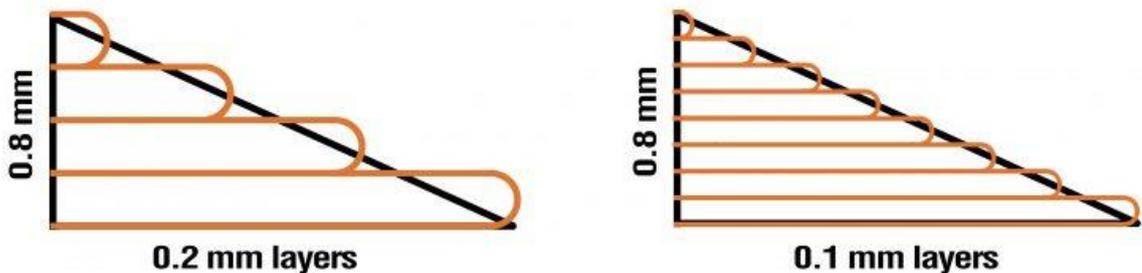


Figura 4: Strati a vari spessori

(https://blog.prusaprinters.org/everything-about-nozzles-with-a-different-diameter_8344/)

2.1.5 Ampiezza pista

L'ampiezza della pista stampata (*raster width*) rappresenta la larghezza del materiale che si va a depositare ed è un altro parametro che influenza la velocità di stampa e la resistenza meccanica. Quest'ultima è fortemente dipendente dall'inclinazione della pista [6]. Solitamente il valore viene posto come la grandezza dell'ugello scalato di un coefficiente 1,2.

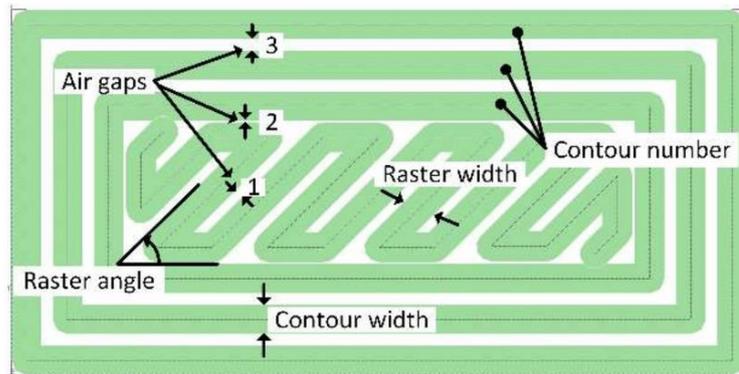


Figura 5: Ampiezza pista ed orientamento

(https://www.researchgate.net/figure/FDM-process-parameters_fig2_324049307)

2.1.6 Macchina

La scelta della macchina influisce sull'ampiezza della gamma di materiali utilizzabili, sulla velocità di stampa possibile, sull'accuratezza, sulla ripetibilità e sulla precisione.

Esistono 2 tipologie di macchine: desktop e industriali. Le macchine desktop hanno prezzi che spaziano da poche centinaia di euro a qualche migliaio, quelle industriali possono arrivare anche a mezzo milione, come nel caso della Stratasys Fortus 900mc.

Un altro fattore da tenere in considerazione nella scelta è il volume di ingombro e i consumi. Quelle desktop possono essere installate in un ripiano e hanno consumi minori di mezzo kWh, al contrario, quelle industriali hanno un ingombro di più di 1 mq. e consumano più di 1 kWh. Alcune macchine possono essere predisposte per ospitare più di un materiale e più di un supporto in contemporanea. Queste ultime possono ridurre i tempi di stampa estrudendo con 2 ugelli in contemporanea.



Figura 6: Stratasys F370 (sinistra) e Raise 3d Pro 2 (destra)

3 Procedimento

3.1 Utilizzo di parole chiave e fonti di informazione

Per lo sviluppo del modello di costo è stata condotta una ricerca attraverso *keywords* che ha permesso di comprendere i vari modelli e le precedenti pubblicazioni fatte in merito all'argomento. Le keywords usate come input sono state:

- FDM model cost
- FDM cost analysis
- FDM costs contributors
- FDM costs breakdown
- FDM materials
- FDM issues
- FDM machine

Le principali fonti da cui si è attinto per le pubblicazioni e i dati sono invece state:

- Researchgate.com
- Ssse.ch
- Sciencedirect.com
- Sagepub.com
- Growingscience.com
- Elsevier.com
- Springer.com
- Cataloghi produttori
- Cataloghi venditori

3.2 Metodo di esecuzione

Dopo aver esaminato vari articoli pubblicati finora, [7] [8] [9] [10] [11] [12] [13] [14], si è trovato che sono stati proposti modelli di costo diversi in base a quali voci vengono considerate preponderanti. Tuttavia, le voci comuni che appaiono sono così divise:

- Costo macchina
- Costo materiale
- Costo operatore
- Costo energia

Oltre a questi, che fanno parte della fase di costruzione, si aggiungono i costi di pre e post produzione, come lo sviluppo del modello 3d o la finitura del pezzo. In questa tesi si andrà ad analizzare la parte centrale, quella di costruzione.

Una volta compreso come strutturare le formule necessarie, il passo successivo è stato quello di andare a trovare i dati necessari per il completamento di queste.

3.3 Banche dati

Allo scopo di rendere la stesura del programma più schematica e aggiornabile possibile, si è valutata necessaria la creazione di alcune banche dati contenenti le caratteristiche delle macchine, dei materiali e del tipo di stampa. Tutto questo è stato fatto in modo che l'operatore che andrà ad eseguire l'operazione possa individuare agevolmente il tempo e il costo di creazione di un pezzo, immettendo la quantità, il volume e scegliendo la macchina ed il materiale. Inoltre, con pochi passaggi, sarà possibile inserire ulteriori stampanti ed ulteriori materiali semplicemente aggiungendo i loro dati nella stessa modalità in cui sono strutturati quelli già presenti.

3.3.1 Database Macchine

I parametri caratterizzanti le macchine sono:

- Ingombri
- Volume di stampa (max X-Y-Z)
- Materiali supportati
- Prezzo
- Consumi potenza elettrica
- Tempi di preparazione, riscaldamento e movimento piatto nell'asse Z

Tabella 1: Scheda macchina desktop Raise 3d Pro 2

Raise3d pro2	Plate width	300	mm	Larghezza massima
Raise3d pro2	Plate length	300	mm	Lunghezza massima
Raise3d pro2	Building height	300	mm	Altezza massima
Raise3d pro2	Price	500 0	€	
Raise3d pro2	Machine area	2	m2	Area Macchina
Raise3d pro2	Z axis movement time	1	seconds	
Raise3d pro2	Maximum power consumption	600	W	Consumo massimo
Raise3d pro2	Time build setup	20	minutes	tempo di preparazione macchina
Raise3d pro2	Warmup Time	6	minutes	tempo riscaldamento piatto
Raise3d pro2	Time build remove	9	minutes	tempo rimozione pezzo

Tabella 2: Scheda machina industriale Stratasys F370

Stratasys F370	Plate width	355	mm	Larghezza massima
Stratasys F370	Plate length	254	mm	Lunghezza massima
Stratasys F370	Building height	355	mm	Altezza massima
Stratasys F370	Price	50000	€	
Stratasys F370	Machine area	15	m2	Area Macchina
Stratasys F370	Z axis movement time	1	seconds	
Stratasys F370	Maximum power consumption	1500	W	Consumo massimo
Stratasys F370	Time build setup	20	minutes	tempo di preparazione macchina
Stratasys F370	Warmup Time	6	minutes	tempo riscaldamento piatto
Stratasys F370	Time build remove	9	minutes	tempo rimozione pezzo

Oltre ai parametri sopracitati ce ne sono altri che sono necessari ad effettuare i vari calcoli:

- Fattore di utilizzo
- % sul costo per la manutenzione annuale
- Ingombro
- Prezzo area ingombro
- Tasso di sconto
- Anni di ammortamento

I valori del secondo elenco hanno lo scopo di determinare il costo orario di ogni macchina. Quest'ultimo è ripartito tra l'ammortamento, la manutenzione e il costo di affitto dell'area su cui la macchina poggia e lo spazio utile all'operatore per muoversi.

Tabella 3: Calcolo costo orario per Raise 3d Pro 2

Name	Value	Unit of measure
Printer	Raise3d pro2	-
Price	5000	€

Annual maintenace cost	500	€/year
Depreciation time	5	years
Discount rate	8%	%
Machine area	2	m2
Building yearly rent rate	130*	€/m2*year
Load Factor	57%*	%
Machine discounted cost	7000	€
Working time	4993	h
Depreciation hourly rate	0,28	€/h
Maintenance hourly rate	0,10	€/h
Machine area hourly rate	0,05	€/h
Costo orario macchina	0,43	€/h

* [15]

I costi calcolati per ogni macchina sono stati posti in una tabella per una più facile lettura.

Tabella 4: Costi orari delle macchine considerate

Name	Category	Unitary Cost	Unit of measure
Ultimaker S3	Desktop	€ 0,36	€/hour
QIDI Tech X-Max	Desktop	€ 0,15	€/hour
Prusa i3 MK3S	Desktop	€ 0,11	€/hour
Creality CR-10 V2	Desktop	€ 0,09	€/hour
Raise3d pro2	Desktop	€ 0,43	€/hour
Tronxy X5SA Pro	Desktop	€ 0,09	€/hour
Stratasys F370	Industriale	€ 4,20	€/hour

3.3.2 Database Materiali

I parametri importanti per i materiali sono:

- Densità
- Prezzo al chilo
- Velocità di stampa consigliata
- Range di velocità di stampa possibili
- Proprietà ed usi possibili

Tabella 5: Caratteristiche e parametri materiali

Name	Density (g/cm ³)	Cost [€/g]	Velocità di stampa (mm/s)
Nylon	1,14	0,03	25
PLA	1,264	0,02	50
ABS	1,04	0,02	50
ASA	1,08	0,03	50
PETG	1,38	0,025	60
TPU	1,13	0,04	30

3.3.3 Database energia e parametri di stampa

Gli altri database necessari allo svolgimento del progetto sono stati quelli relativi all'energia e alla tipologia di accuratezza:

Tabella 6: Costi dell'energia

Parametro	Value	Unit of measure
Prezzo energia	0,2	€/KWh

Tabella 7: Parametri di stampa

Accuratezza	Layer thickness [mm]	Extrusion width [mm]
Alta	0,1	0,3
Media	0,2	0,48
Bassa	0,3	0,72

4 Modello di costo

4.1 Caratteristiche componente

È stato deciso di creare una pagina iniziale “Parametri componente” in cui l’operatore andrà ad inserire:

- Ingombro X-Y-Z del modello
- Volume del componente
- Volume dei materiali di supporto
- Numero di pezzi

Si dovrà anche scegliere:

- Materiale
- Accuratezza

L’ingombro X-Y è essenziale per verificare se il modello possa essere accolto nella camera di stampa o meno. L’ingombro Z ha anch’esso lo scopo delle altre due misure, ma ha anche quello di definire il numero di strati che si andranno a depositare.

Il numero di strati che verranno creati dipende dalla massima altezza del pezzo e dall’altezza di ogni strato (questa è definita dal parametro accuratezza).

Tabella 8: Dati di input dell’operatore

Parametri componente	Valore	Unità di misura
Size X	1	mm
Size Y	1	mm
Size Z	22,7	mm
Volume totale pezzi	9.924	mm ³
Volume supporto totale pezzi	14.495	mm ³
Materiale	ABS	-
Numero di pezzi	1	-
Accuratezza	Alta	-

Questo modello di costo è stato creato con l'idea che, nel caso di stampa di più componenti contemporaneamente, questi siano lo stesso pezzo ripetuto, quindi stessa geometria, stesso volume e stessi supporti.

4.2 Build

Il passo successivo per la realizzazione del modello è stato quello di redigere una pagina, denominata *Build*, in cui sono stati inseriti tutti i calcoli con le rispettive formule, utili all'esecuzione del programma.

4.2.1 Restrizioni

Allo scopo di evitare problemi di incompatibilità tra volume del pezzo e volume massimo di stampa della macchina, ma anche tra materiale e macchina, sono state redatte delle regole che forniscono un responso immediato delle varie tolleranze:

Tabella 9: Compatibilità misure, macchina e materiale

Condizioni stampa	Responso
Grandezza X	OK
Grandezza Y	OK
Grandezza Z	OK
Accopp. Macchina-Materiale	OK

4.2.2 Tempi di processo

Tempo di stampa = $BuildTime + SetupTime + Tempo\ riscaldamento +$
 $Tempo\ rimozione\ pezzo + Tempo\ totale\ spostamento\ piatto$

- BuildTime = tempo di estrusione materiale

- SetupTime = tempo di preparazione macchina [15]
- Tempo riscaldamento = tempo riscaldamento piatto e ugello
- Tempo rimozione pezzo = tempo necessario alla rimozione del pezzo e dei supporti grossolani

$$\text{BuildTime} = \frac{\left(\frac{\text{Volume}_{\text{pezzo}} + \text{Volume}_{\text{di supporto}}}{\text{Layer thickness} * \text{Extrusion width} * \text{Velocità stampa}} \right)}{60} * (1 + \text{coefficiente di spreco})$$

- Coefficiente di spreco: tiene conto dell'eventuale tempo usato per stampare materiale in eccesso o difettoso [16]

Tabella 10: Tabella dei tempi

Build time	min	Tempo totale di stampa	271
Temo totale spostamento z	min	Totale tempo movimento piatto	4
Velocità stampa	mm/s	velocità di stampa	50
Layer thickness	mm	Altezza layer	0,1
Extrusion width	mm	ampiezza estrusione	0,3
Number of layers	-	Numero di stratti	227
tempo spostamento piatto	min	tempo movimento piatto su asse z	0,02
Setup time	min	tempo preprazione macchina	20
Warm up time	min	tempo riscaldamento nozzle ed eventuale piatto	6
Removal time	min	tempo estrazione pezzi	9
Tempo totale	min	Tempo totale di processo	296
Tempo totale per 1 pezzo	min	Tempo di un singolo componente	296

4.2.3 Materia prima

$$\text{Costo totale materiale} = \left(\left(\frac{\text{Volume}_{\text{Pezzi}}}{1000} \right) * \text{Densità}_M * \text{Costo}_{\text{Grammo Materiale}} + \left(\frac{\text{Volume}_{\text{Supporti}}}{1000} \right) * \text{Densità}_{\text{Materiale Supporti}} * \text{Costo}_{\text{Grammo Materiale Supporti}} \right) * (1 + \text{coefficiente di spreco})$$

Il volume pezzi e il volume supporti sono considerati come i volumi totali da stampare (nel caso di più componenti nella camera di stampa).

Tabella 11: Calcolo costi materiali consumati

Material unitary cost	€/kg	Costo unitario materia prima	20,00
Material costo per g	€/g	Costo materiale al grammo	0,02
Densità componente	g/cm ³	densità materiale	1,04
Densità supporto	g/cm ³	densità materiale supporto	1,04
Material Volume	mm ³	Totale volume stampato per gli n pezzi	9924
Support material volume	mm ³	Totale volume stampato come supporto per gli n pezzi	14495
Peso	g	Peso totale stampato dalla macchina per blocco di pezzi	25,40
Costo totale materiale	€	costo del materiale	0,51
Costo totale materiale per 1 pezzo	€	costo materiale per 1 pezzo	0,51

4.2.4 Energia elettrica

$$\text{Costo totale energia} = \text{Prezzo Energia} * \text{Tempo impiego energia elettrica} * \left(\frac{\text{Potenza della macchina}}{1000} \right)$$

Tabella 12: Calcolo costi dell'energia consumata

Price energy	€/kWh	Costo unitario energia elettrica	0,200
Energy usage time	hours	Tempo impiego energia elettrica	4,622
Energy cost	€	Costo complessivo energia elettrica	0,555
Costo energia per 1 pezzo	€	Costo energia per produrre 1 pezzo	0,55

4.2.5 Macchina

$$\text{Totale costo macchina} = (\text{Costo ammortamento macchina} + \text{Costo manutenzione macchina} + \text{Costo area macchina}) * \left(\frac{\text{Tempo totale di processo}}{60} \right)$$

$$\text{oppure} = \text{Costo orario macchina} * \frac{\text{Tempo totale di processo}}{60}$$

Tabella 13: Calcolo costi di macchina

Deprecation cost	€	Costo ammortamento macchina	0,28
Maintenance cost	€	costo manutenzione macchina	0,10
Machine's area cost	€	costo affitto area di macchina	0,05

Totale costo macchina	€	costo utilizzo macchina	2,13
Totale costo macchina per 1 pezzo	€	costo utilizzo macchina per 1 pezzo	2,13

4.2.6 Operatore

$$\text{Totale costo operatore} = \text{Costo orario lavoratore} * \left(\frac{\text{Tempo di setup} + \text{Tempo di rimozione}}{60} + \frac{\text{BuildTime}}{60} * \text{Percentuale costo operatore in fase di build} \right)$$

Tabella 14: Calcolo costo operatore

Costo orario lavoratore	€/h	costo orario lavoratore	30
Costo operatore	€	costo operatore per blocco pezzi	21,07
Costo operatore per 1 pezzo	€	costo operatore per 1 pezzo	21,07

- Percentuale costo operatore in fase di build: In questo studio si è considerato che, nella fase di stampa del componente, l'operatore sia libero di lavorare su altre macchine e quindi viene pagato solamente in parte. In questo modo si riduce drasticamente il costo operaio, perché questo è tenuto solo a supervisionare che il processo stia avvenendo regolarmente.

4.3 Riepilogo

$$\text{Costo totale} = \text{Costo macchina} + \text{Costo operatore} + \text{Costo energia} + \text{Costo materiali}$$

Tabella 15: Sommatoria costi totali

TotalMaterialCost	€	Costo materiale e materiale supporto per singolo pezzo	€ 0,51
MachineCost	€	Costo macchina per singolo pezzo	€ 2,13
LabourCost	€	Costo lavoratore per singolo pezzo	€ 21,07
TotalEnergyCost	€	Costo energia per singolo pezzo	€ 0,55
TOTAL COST			€ 24,26

4.4 Ripartizione tempi e costi

L'ultima fase nella parte di Build è stata quella di creare dei grafici che potessero esplicitare in che modo sono ripartiti i tempi ed i costi di tutto il processo di stampa.

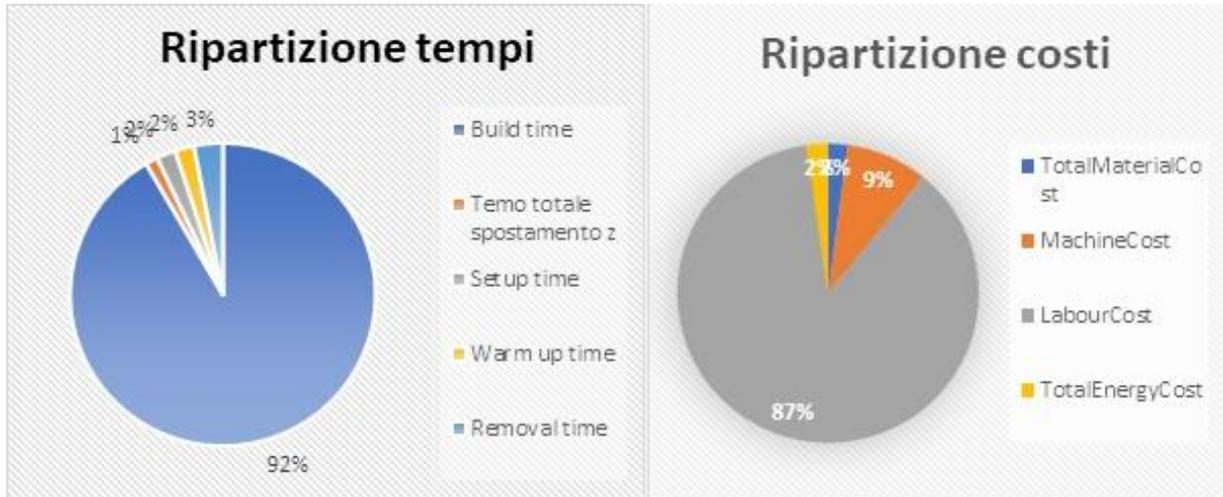


Figura 7: Grafico distribuzione tempi (sinistra) e distribuzione costi (destra)

5 Caso studio

Allo scopo di verificare l'attendibilità del programma ed individuare le criticità in esso, si è deciso di testarlo con due campioni studio.



Figura 8: Modello 3d collettore inferiore (sinistra) e superiore (destra)

5.1 Valori preliminari

Il primo passo è stato quello di utilizzare AutoDesk NetFabb per individuare:

- Altezza z componente
- Volume supporti generati
- Numero massimo di pezzi che il piatto può contenere

Tabella 16: Dati forniti da NetFabb per singolo componente

-	Collettore inferiore	Collettore superiore
Volume	9924 mm ³	11239 mm ³
Volume supporto	14495,4 mm ³	11782 mm ³
Altezza Z	22,7 mm	27,35 mm

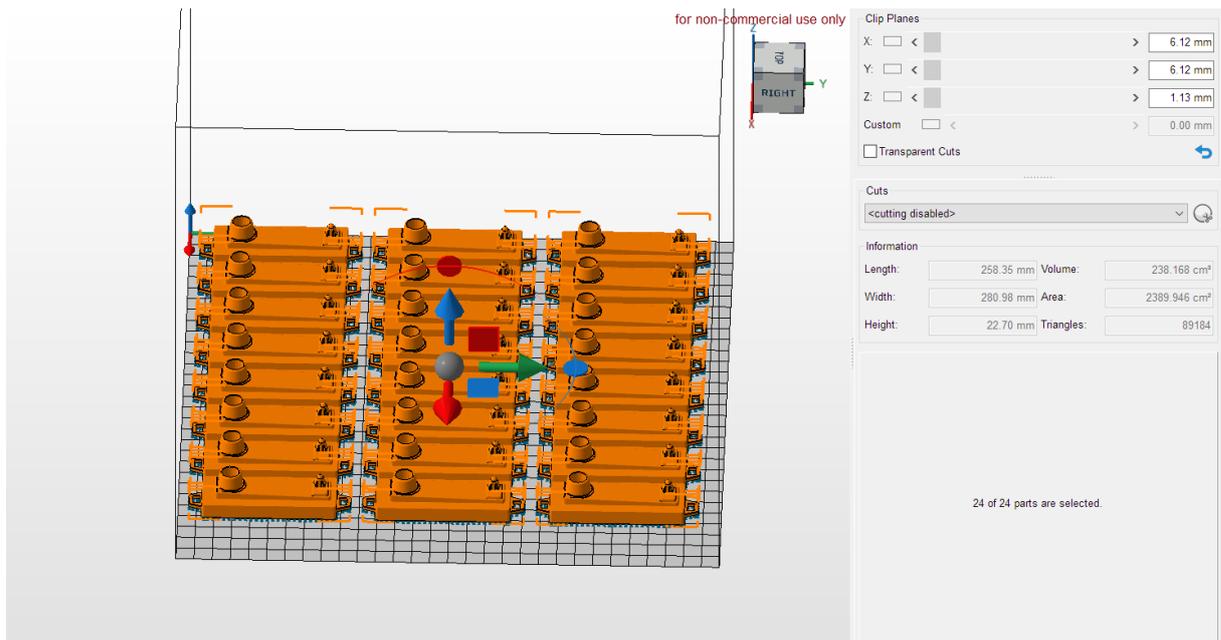


Figura 9: Blocco collettori inferiori con supporti

Immettendo queste informazioni nel modello è stato possibile stimare il costo di creazione di ciascun pezzo al variare del numero di essi stampati contemporaneamente, della macchina, del materiale e dell'accuratezza.

Per limitare il campione di tutte le possibili varianti di combinazione è stato deciso di utilizzare una macchina per il segmento desktop (*Raise 3d Pro 2*) ed una per quello industriale (*Stratasys F370*). I parametri di accuratezza sono stati *Media* e *Alta* [17] mentre i materiali usati (*ABS, ASA, PLA e TPU*) sono stati presi in modo da essere compatibili con entrambe le stampanti.

I vari test sui costi sono stati condotti su 1, 2, 5, 10 e successivamente sul numero massimo di pezzi che il letto di stampa supportasse: 21 nel caso della *Stratasys F370* e 24 nella *Raise 3d Pro 2*.

Avendo il collettore superiore e il collettore inferiore misure simili, i numeri massimi stampabili di pezzi sono risultati gli stessi.

Una volta ricavate le tabelle con l'andamento dei prezzi, sono stati estrapolati i grafici riassuntivi.

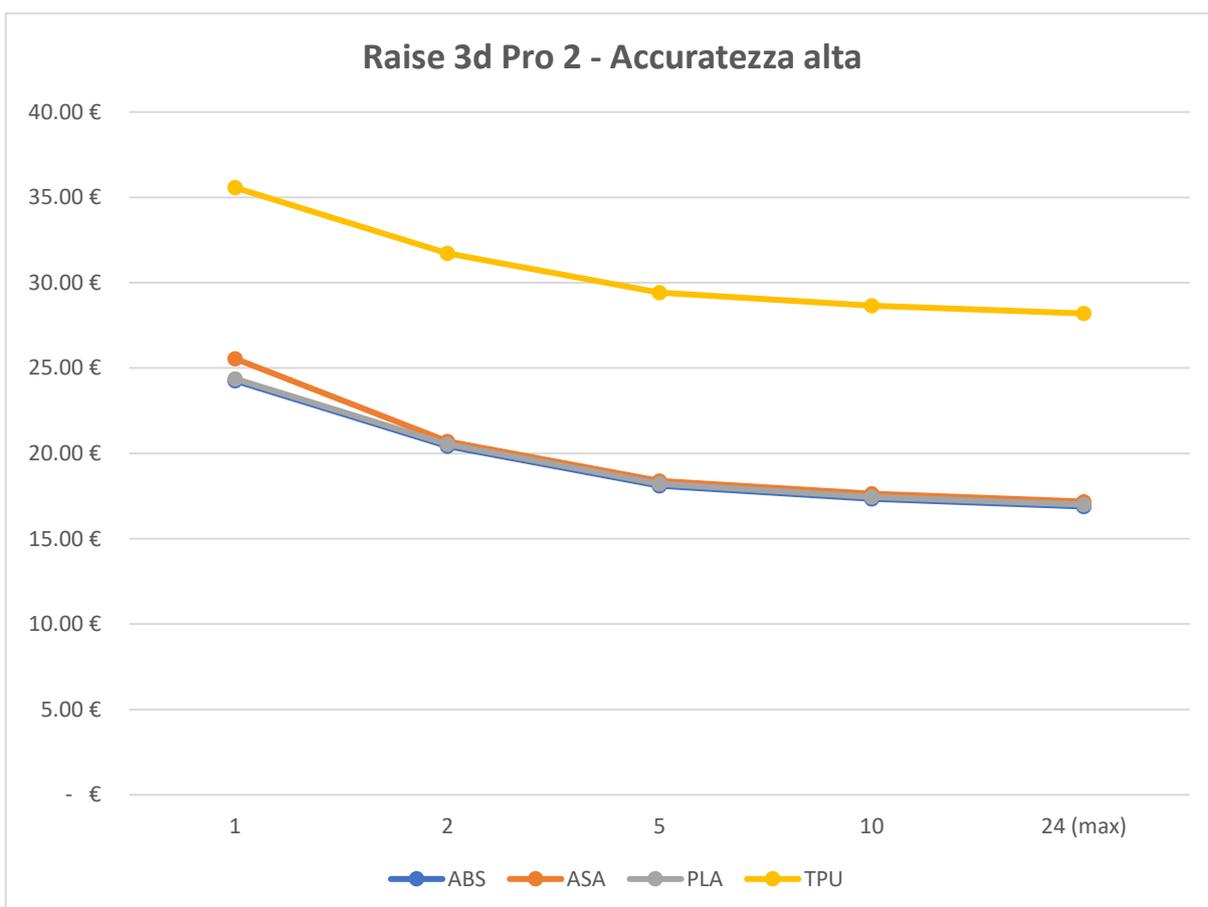
5.2 Risultati collettore inferiore

5.2.1 Stampante desktop - Accuratezza alta

Tabella 17: Andamento prezzo collettore inferiore Raise 3d Pro 2 - 0,1 spessore - 0,3 larghezza

Nr° pezzi	ABS	ASA	PLA	TPU
1	24,26 €	25,55 €	24,37 €	35,57 €
2	20,42 €	20,70 €	20,53 €	31,72 €
5	18,11 €	18,39 €	18,22 €	29,42 €
10	17,34 €	17,63 €	17,45 €	28,65 €
24 (max)	16,89 €	17,18 €	17,00 €	28,20 €

Tabella 18: Grafico riassuntivo andamento prezzo

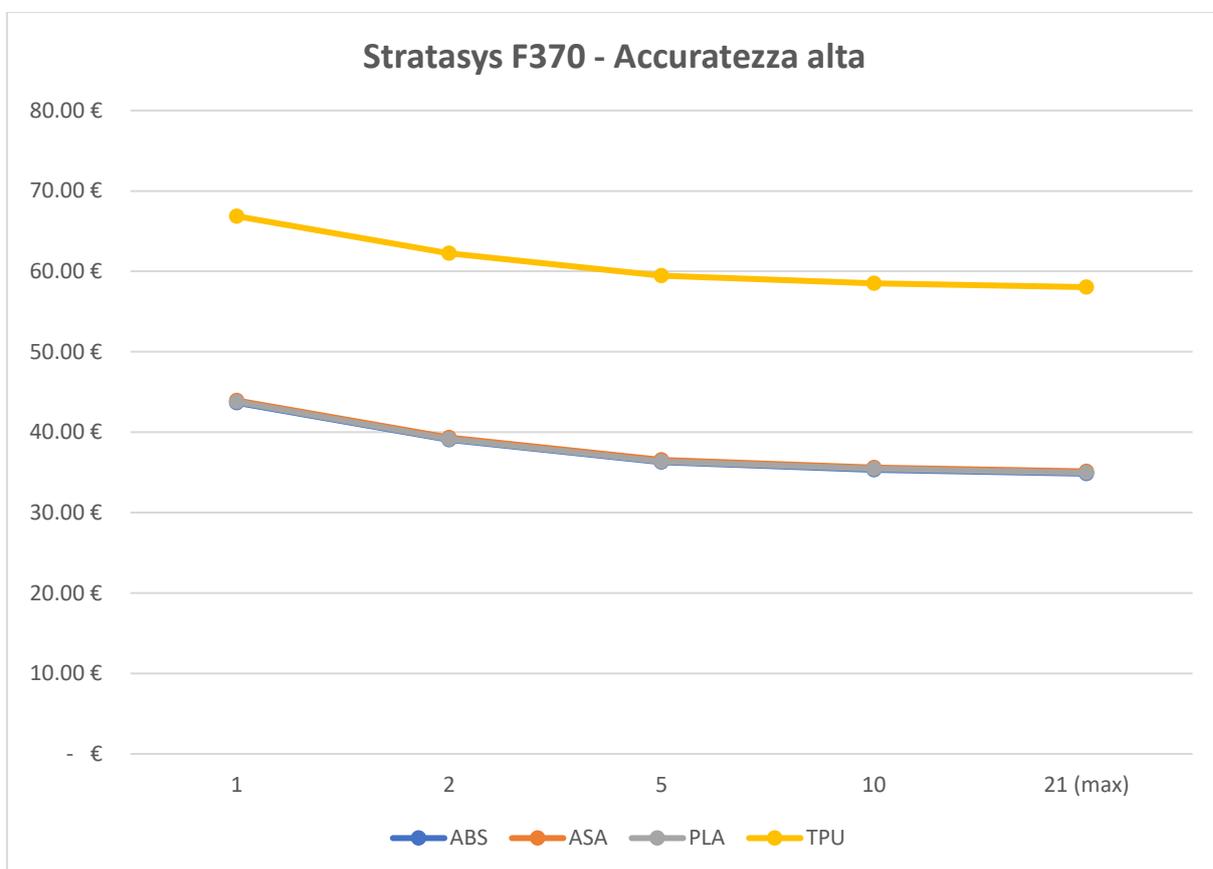


5.2.2 Stampante industriale - Accuratezza alta

Tabella 19: Andamento prezzo collettore inferiore Stratasys F370 - 0,1 spessore - 0,3 larghezza

Nr° pezzi	ABS	ASA	PLA	TPU
1	43,67 €	43,95 €	43,78 €	66,86 €
2	39,04 €	39,32 €	39,14 €	62,23 €
5	36,26 €	36,54 €	36,37 €	59,45 €
10	35,33 €	35,61 €	35,44 €	58,52 €
21 (max)	34,85 €	35,13 €	34,95 €	58,04 €

Tabella 20: Grafico riassuntivo andamento prezzo



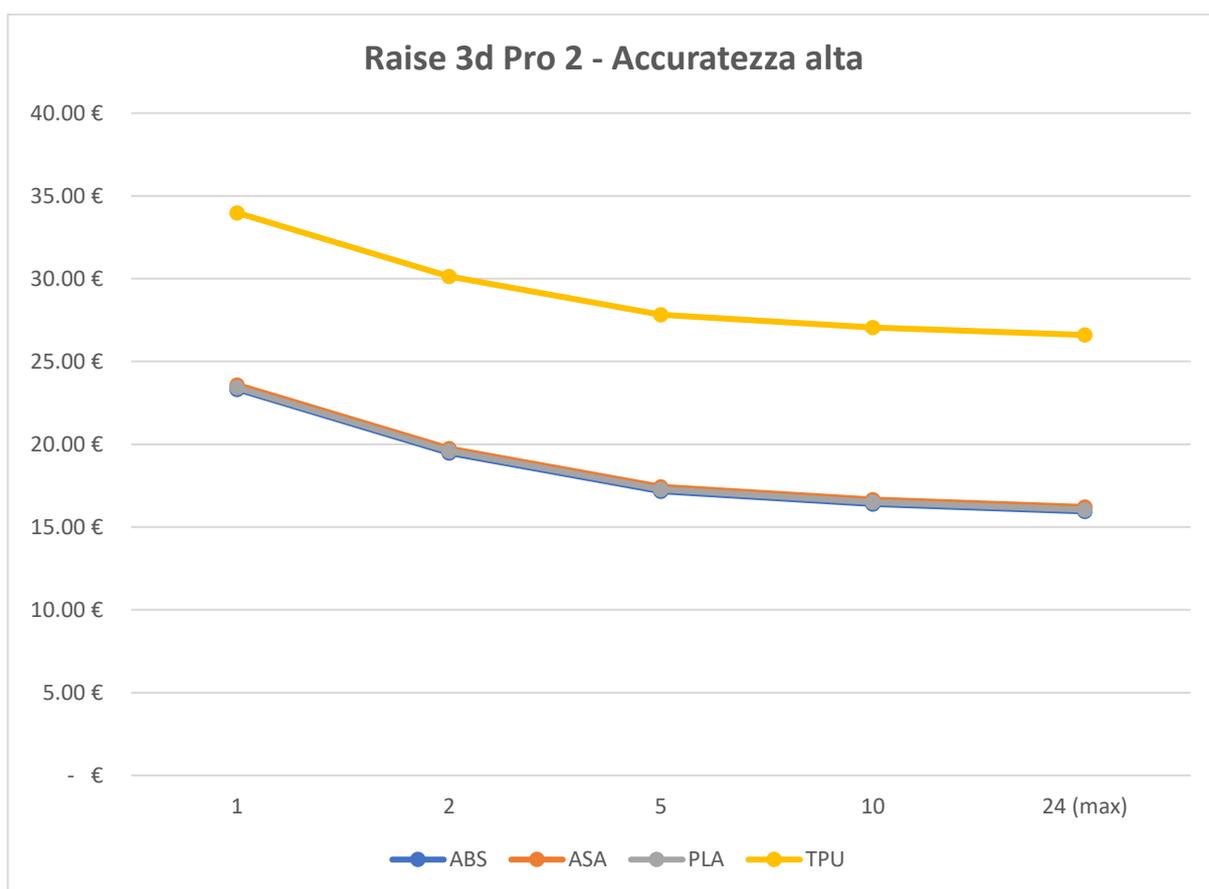
5.3 Risultati collettore superiore

5.3.1 Stampante desktop - Accuratezza alta

Tabella 21: Andamento prezzo collettore superiore Raise 3d Pro 2 - spessore 0,1 - larghezza 0,3

Nr° pezzi	ABS	ASA	PLA	TPU
1	23,32 €	23,59 €	23,42 €	33,98 €
2	19,47 €	19,74 €	19,58 €	30,13 €
5	17,16 €	17,43 €	17,27 €	27,82 €
10	16,39 €	16,66 €	16,50 €	27,05 €
24 (max)	15,94 €	16,21 €	16,05 €	26,60 €

Tabella 22: Grafico riassuntivo andamento prezzo

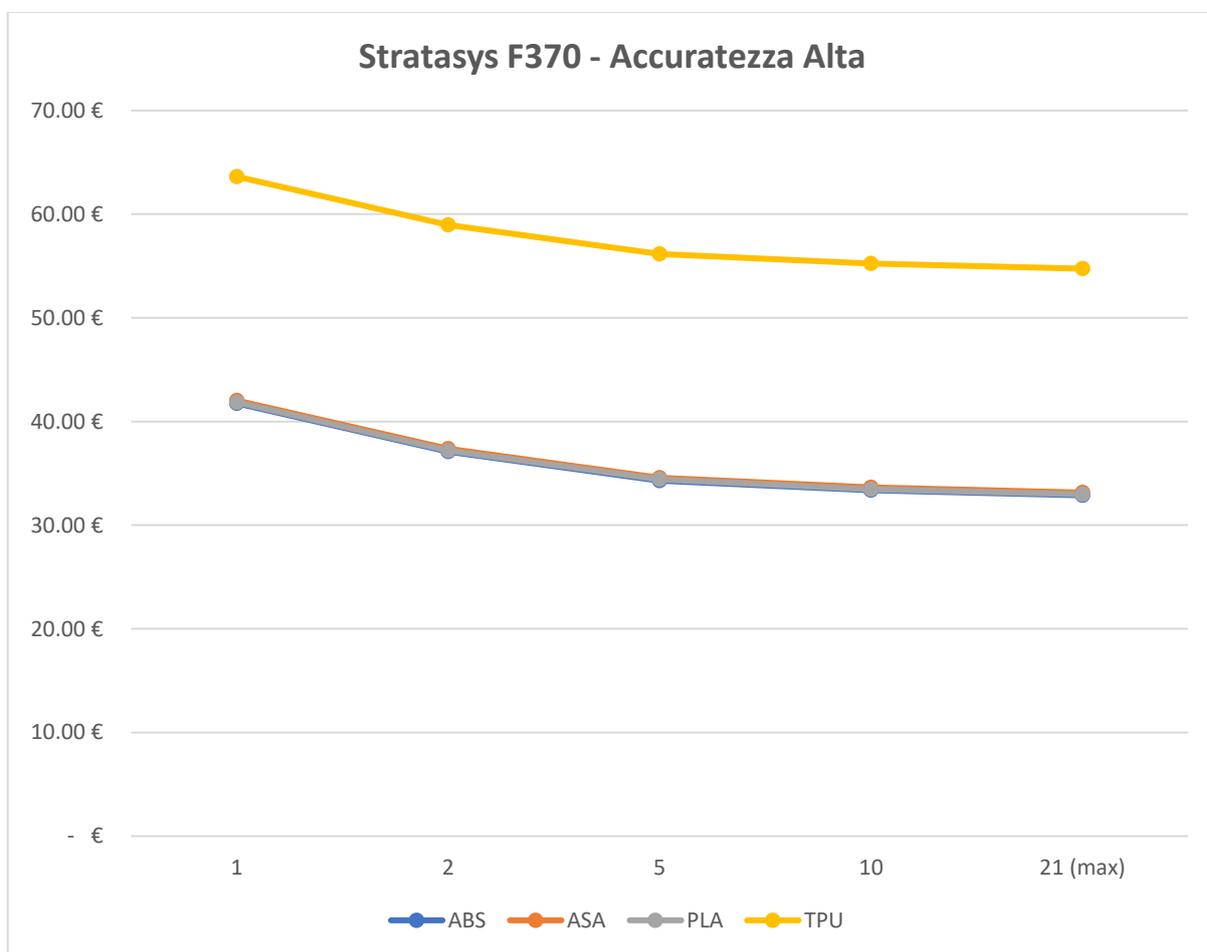


5.3.2 Stampante industriale - Accuratezza alta

Tabella 23: Andamento prezzo collettore superiore Stratasys F370 - spessore 0,1 - larghezza 0,3

Nr° pezzi	ABS	ASA	PLA	TPU
1	41,75 €	42,02 €	41,85 €	63,62 €
2	37,09 €	27,36 €	37,20 €	58,96 €
5	34,30 €	34,56 €	34,40 €	56,16 €
10	33,37 €	33,63 €	33,47 €	55,23 €
21 (max)	32,88 €	33,14 €	32,98 €	54,74 €

Tabella 24: Grafico riassuntivo andamento prezzo



5.4 Comparazioni

5.4.1 Prezzi online

I valori ottenuti dai servizi online sono stati ricavati da quattro diversi siti di stampa, tenendo conto della sommatoria del costo di collettore superiore + collettore inferiore.

I costi risultanti sono:

Tabella 25: Prezzi preventivi servizi online

Costi FDM ABS	3DHUBS	SD3D	Craftcloud	Xometry	Media
1	41,56 €	68,00 €	19,72 €	15,83 €	36,28 €
10	13,28 €	14,98 €	3,31 €	15,82 €	11,85 €
100	6,15 €	6,47 €	2,57 €	15,79 €	7,75 €
1000	3,75 €	5,34 €	1,67 €	15,79 €	6,64 €

Come si può vedere, diversi siti danno diverse stime, anche molto differenti tra di loro.

Tabella 26: Comparazione e scostamento

Quantità	Valori ottenuti	Media siti	Scostamento
1	€ 47,58	€ 36,28	€ 11,30
10	€ 33,73	€ 11,85	€ 21,88

Lo scostamento è di circa il 30% nel caso di un singolo pezzo e aumenta fino al 180% nel caso di 10 pezzi.

Una delle possibili spiegazioni di questi scostamenti è il costo del lavoratore, in quanto in questo studio è stato considerato che esso venisse pagato il 10% del suo normale costo durante la fase di stampa. Se la stampa è molto lunga, la parte più consistente del prezzo di realizzazione è imputabile all'operaio.

5.4.2 Operatore durante la costruzione

Ipotizzando di eliminare la voce costo operatore durante la fase di *Build*, ma mantenendo tutti gli altri parametri inalterati, ed assumendo il caso ideale in cui si possano stampare fino a 1000 pezzi contemporaneamente nello stesso letto, i risultati sono:

Tabella 27: Costo singolo pezzo senza operaio in Build (ABS – Accuratezza alta)

Quantità	Valore ottenuto	Media online	Scostamento
1	35,42€	36,28 €	-0,86€
10	8,80€	11,85 €	-3,05€
100	6,13€	7,75 €	-1,62€
1000	5,87€	6,64 €	-0,77€

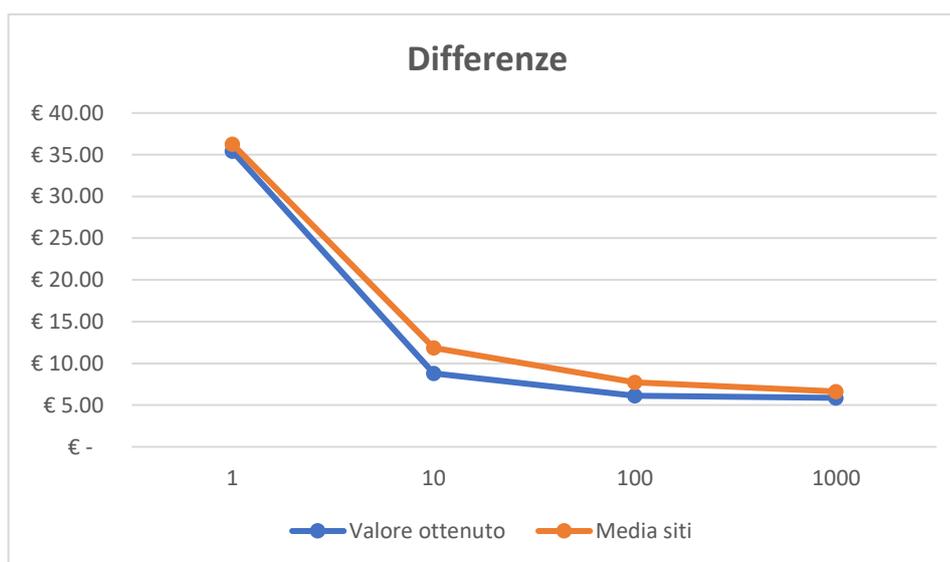


Figura 10: Scostamento prezzi senza operaio

Come si può vedere, lo scostamento è ridotto a pochi punti percentuale. Questo allineamento di prezzi, tra il modello e la media online, potrebbe stare a significare quindi che questi ultimi non considerano l'operatore durante la fase di costruzione, ma solamente nella preparazione e rimozione. Il motivo per cui i valori ottenuti sono minori rispetto a quelli dei siti, può essere inputato al fatto che il modello tiene conto solamente dei costi e non dei ricavi che si devono ottenere da ciascun manufatto.

5.4.3 Condizioni di massimo

L'ipotesi precedente di poter stampare 1000 pezzi contemporaneamente nel letto di stampa è stata fatta perché in questo modo i supporti di ciascuno di essi sono uguali.

È stato studiato inizialmente anche di poter impilare i pezzi nel volume di stampa, quindi stampando su più livelli. In questo modo si potevano creare più di 200 pezzi contemporaneamente, ma si è visto che il prezzo aumentava drasticamente. La causa di questo andamento può essere ricondotta al fatto che il volume dei supporti dei livelli superiori a quello base fossero addirittura 3 volte il volume del pezzo stampato. In questo modo vi era abbassamento del costo fin quando non si raggiungesse il numero massimo che il letto potesse accogliere (24 per Raise 3d Pro 2 e 21 per Stratasys F370).

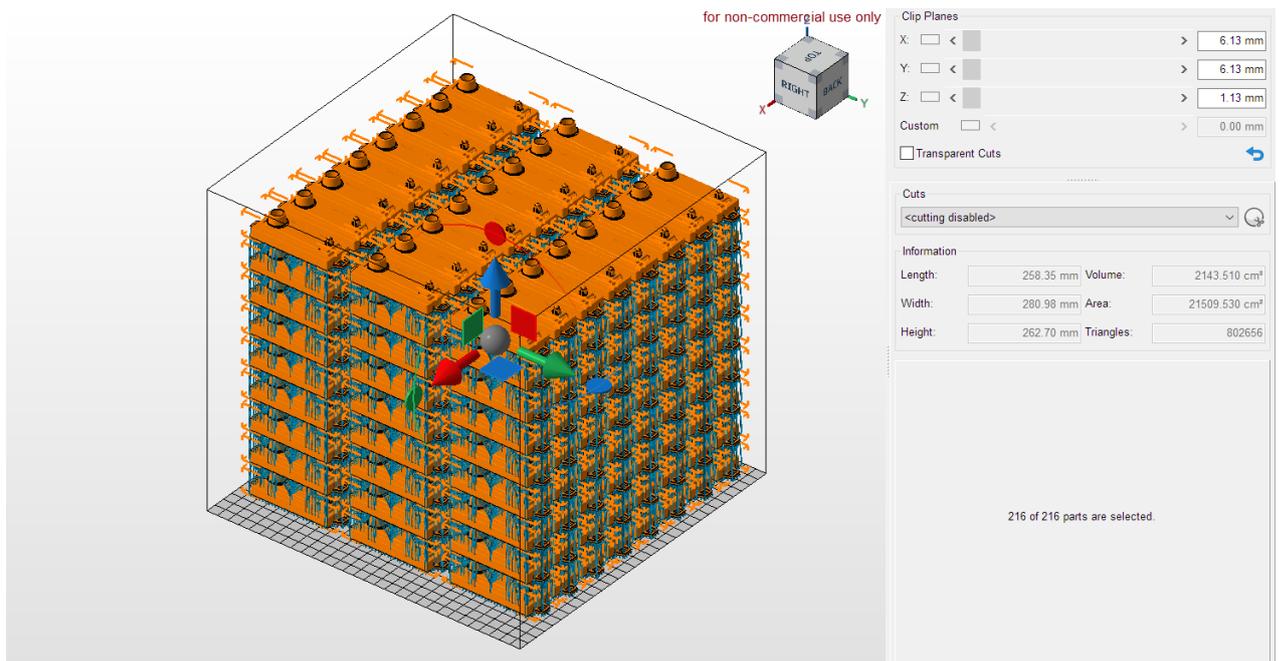
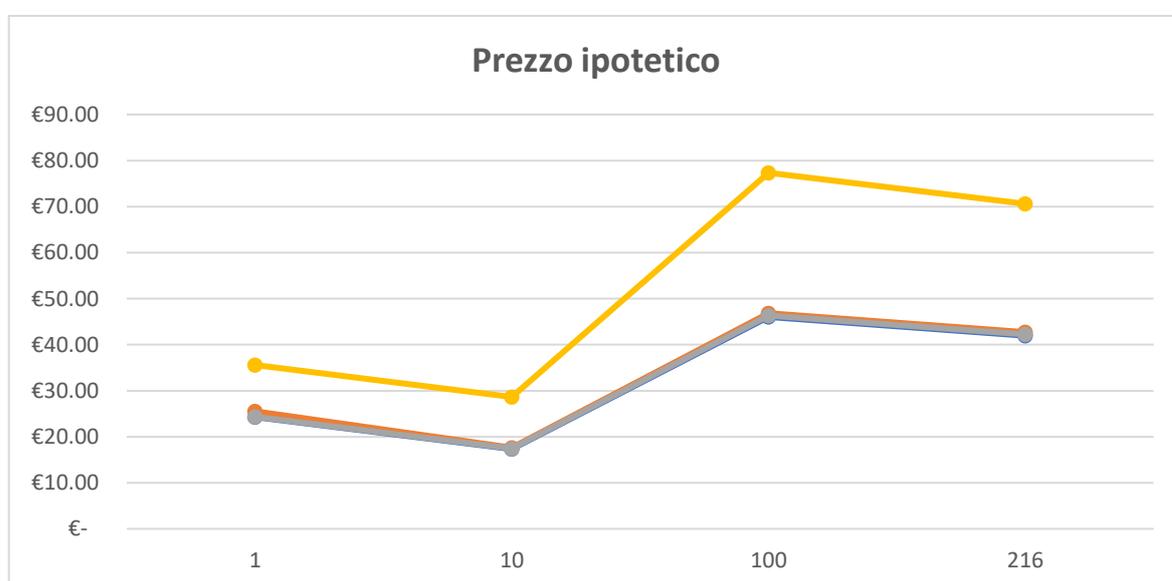


Figura 11: Blocco collettori inferiori multilivello con supporti

Tabella 28: Andamento prezzi riempiendo la camera di stampa (Raise 3d Pro 2)

Quantità	ABS	ASA	PLA	TPU
1	€ 24,26	€ 25,55	€ 24,37	€ 35,57
10	€ 17,34	€ 17,63	€ 17,45	€ 28,65
100	€ 46,04	€ 46,83	€ 46,34	€ 77,34
216	€ 42,00	€ 42,72	€ 42,28	€ 70,62

Tabella 29: Curva prezzi stampando su piani impilati



6 Conclusione e considerazioni

Lo scopo iniziale di questa tesi era quello di realizzare un modello di costo il più attendibile possibile e, per fare questo, si è cercato di prendere valori precisi. I dati dei parametri che variano in base al pezzo che si realizza, non quindi desumibili a priori, si sono dovuti assumere medi, come nel caso dei tempi *setup*, *removing* e *warmup*, e massimi, come nel caso della potenza macchina.

Il numero di materiali è stato limitato, in quanto in commercio ve ne sono svariate decine o centinaia, alcuni studiati appositamente per una singola macchina.

È stato deciso di utilizzare un'accuratezza impostabile su 3 livelli (bassa, media e alta) che va ad influire sullo spessore dello strato stampato e l'ampiezza della pista. L'accuratezza è uno dei parametri che più incide sul tempo di stampa. L'altro parametro che caratterizza il tempo è la velocità di stampa, la quale può essere scelta in un range per ogni materiale, anche se il programma è stato impostato per utilizzare quelle consigliate.

Altro fattore su cui incidono questi parametri è la resistenza meccanica: minore è la velocità e più la resistenza meccanica migliora [18] [1] [19] [20] [21] [22] [17].

Una delle criticità della comparazione dei risultati con modelli simili, come quello dei siti online in questo caso, è la grande diversità di prezzi che possono venir calcolati, ad esempio semplicemente utilizzando stampanti diverse. L'impiego di stampanti desktop è consigliato per produrre pochi pezzi che non hanno bisogno di piccole tolleranze, in questo modo si riduce di molto il costo dovuto alla macchina. Se lo scopo è quello di produrre grandi lotti in serie con alte precisioni ed alta ripetibilità, allora è necessario l'impiego di stampanti industriali. Altro motivo per privilegiare le macchine industriali è la possibilità di utilizzo di materiali speciali appositamente studiati per esse.

Nel *case study* si è visto che i pezzi stampati in ABS, ASA e PLA hanno dato sempre prezzi simili, mentre quelli in TPU costano generalmente il 50% in più. Questa discordanza tra i primi 3 e il TPU è dovuta al fatto che questo costi più degli altri (40€/g) e abbia una velocità ottimale di stampa di circa la metà (30mm/s contro i 50-60mm/s degli altri).

Questo studio è stato sviluppato focalizzandosi sulla parte di costruzione, andando solamente a toccare il pre e post processo (*setup, warmup e remove*). Uno sviluppo futuro, ed un possibile ampliamento di questo programma, può essere fatto rivedendo i tempi di ciascuna di queste fasi. Il tempo di riscaldamento può essere minore o maggiore in base alla potenza della macchina, al materiale da stampare ed al materiale dell'estrusore. Il tempo di rimozione dei supporti, nella fase di post-produzione, può variare molto in base alla complessità geometrica e dimensionale del componente stampato. Altri tempi possibili da considerare sono quelli di spostamento della testina su uno stesso stratto quando non estrude materiale.

La considerazione dei tempi più specifici e l'individuazione della retribuzione dell'operatore in fase di costruzione dovrebbero essere i successivi passi per migliorare il programma.

7 Riferimenti

- [1] [1] [2] L. Miazio, «Impact of print speed on strenght of samples printed in FDM technology,» *Sciendo*, vol. 3, n. 2, pp. 33-38, 2019.
- [3] [2] [4] K. G. Jaya Christiyan, U. Chandrasekhar e K. Venkateswarlu, «A study on the influence of process parameters on the Mechanical Properties of £D printeds ABS composite,» *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 114, 2016.
- [5] [3] [6] V. E. Kuznetsov, A. N. Solonin, O. D. Urzhumtsev, R. Schilling e A. G. Tavitov, «Strenght of PLA Components Fabricated with Fused Deposition Technology using a desktop 3d printer as function of geometrical parameters of the process,» *Journal of Material Science & Engineering*, 2018.
- [7] [4] [8] F. Othman, F. A. Tahseen e B. A. Hind, «Influence of layer thickness on impact property of 3D-Printed PLA,» *International research journal of engineering and technology (IRJET)*, 2018.
- [9] [5] [10] M. Pérez, G. Medina-Sanchez, A. Garcia-Collado, M. Gupta e D. Carou, «Surface Quality Enhancement of Fused Deposition,» *MDPI*, 2018.
- [11] [6] [12] S.-H. Ahn, M. Montero, D. Odell, S. Roundy e P. K. Wright, «Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS,» *Rapid Prototyping*, vol. 8, n. 4, pp. 248-257, 2002.
- [13] [7] [14] M. O.A., M. S.H. e B. J.L., «Parametric Analysis of the Build Cost for FDM Additive Processed Parts Using Response Surface Methodology,» *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, 2016.
- [15] [8] [16] J. Fauth, A. Elkaseer e S. G. Scholz, «Total Cost of Ownership for Different State of the Art FDM Machines (3D Printers),» in *Sustainable Design and Manufacturing 2019*, 2019, pp. 351-361.

- [17] [9] [18] C. H. Pereira Mello, M. C. Rafael e d. O. P. Edson, «Systematic proposal to calculate price of prototypes manufactured through rapid prototyping an FDM 3D printer in a university lab,» *rapid prototyping journal*, pp. 411-416, 2019.
- [19] [10] [20] D. S. Ingole, T. R. Deshmukh e K. M. Ashtankar, «Build orientation analysis for minimum cost,» *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, vol. 26, n. B, pp. 1925-1938, 2011.
- [21] [11] [22] A. Mahadik e M. Dale, «Implementation of Additive Manufacturing Cost Estimation,» *Procedia Manufacturing*, vol. 17, pp. 70-77, 2018.
- [23] [12] [24] 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.
- [25] [13] [26] G. Costabile, M. Fera, F. Fruggiero, A. Lambiase e D. Pham, «Cost models of additive manufacturing: A literature review,» *International Journal of industrial Engineering COmputations*, vol. 8, pp. 263-282, 2016.
- [27] [14] [28] D. S. Thomas e G. W. Stanley, «Costs and Cost Effectiveness of,» *NIST Special Publication* , vol. 1176, 2014.
- [29] [15] [30] N. Hopkinson e P. Dickens, «Analysis of rapid manufacturing – using layer manufacturing processed for production,» *Proc. Instn Mech. Engrs*, vol. 217, 2003.
- [31] [16] [32] R. Song e C. Telenko, «Material waste of commercial FDM printers under realistic conditions,» *Solid Freeform Fabrication*, 2016.
- [33] [17] [34] N. Ayilimis, «Effect of layer thickness on surface properties of 3D printed marrials produced from wood flour/PLA filament,» *Polymer Testing*, vol. 71, pp. 163-166, 2018.
- [35] [18] [36] K. A. Sood, R. K. Ohdar e S. S. Mahapatra, «Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts,» *Materials and Design*, vol. 31, pp. 287-295, 2010.

- [37] [19] [38] K. S. Raam, S. Sridhar, R. Venkatraman e M. Venkatesan, «Polymer additive manufacturing of ASA structure: Influence of printing parameters on mechanical properties,» *Materials Today: Proceedings*, 2020.
- [39] [20] [40] K. M. Ajay, M. S. Khan e S. B. Mishra, «Effect of machine parameters on strength and hardness of FDM printed carbon fiber reinforced PETG thermoplastics,» *Materials Today: Proceedings*, vol. 27, pp. 975-983, 2020.
- [41] [21] [42] B. Rankouhi, S. Javadpour, F. Delfanian e T. Letcher, «Failure Analysis and Mechanical Characterization of 3D Printed ABS With Respect to Layer Thickness and Orientation,» *ASM International*, vol. 16, pp. 467-481, 2016.
- [43] [22] [44] P. Shubham, A. Sikidar e T. Chand, «The Influence of Layer Thickness on Mechanical Properties of the FDM Printed ABS Polymer by Fused Deposition Modeling,» *Key Engineering Materials*, pp. 63-67, 2016.
- [45] [23] [46] M. Ruffo, C. Tuck e R. Hague, «Cost estimation for rapid manufacturing - laser sintering production for low to medium volumes,» *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, vol. 220, n. B, pp. 1417-1427, 2006.
- [47] [24] [48] B. H. Lee, J. Abdullah e Z. A. Khan, «Optimization of rapid prototyping parameters of production of flexible ABS object,» *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 169, pp. 54-61, 2005.