



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in **Ingegneria Meccanica**

**STUDIO E SVILUPPO DI UN MODELLO DI COSTO DEL
SELECTIVE LASER MELTING**

**STUDY AND DEVELOPMENT OF A SELECTIVE LASER
MELTING COST MODEL**

Relatore:

Dott. Ing. **Marco Mandolini**

Tesi di Laurea di:

Giancarlo Riserbato

Anno Accademico **2019 / 2020**

INDICE

INTRODUZIONE	- 1 -
1. STATO DELL'ARTE	- 3 -
1.1. SELECTIVE LASER MELTING (SLM).....	- 3 -
1.2. MACCHINE DI STAMPA	- 6 -
1.2.1. EOS.....	- 7 -
1.2.2. CONCEPT LASER	- 10 -
1.2.3. SLM SOLUTION.....	- 12 -
1.2.4. RENISHAW.....	- 14 -
1.3. RICERCA BIBLIOGRAFICA.....	- 15 -
2. MODELLO DI COSTO	- 21 -
2.1. TEMPI DEL PROCESSO BUILD.....	- 21 -
2.2. COSTO DEL PROCESSO BUILD	- 26 -
2.2.1. MATERIAL COST	- 27 -
2.2.2. MACHINE COST	- 27 -
2.2.3. LABOUR COST.....	- 28 -
2.2.4. CONSUMABLE COST.....	- 29 -
2.2.5. ENERGY COST	- 31 -
2.2.6. EQUIPMENT COST	- 32 -
3. DATABASE.....	- 33 -
3.1. MACCHINE DI STAMPA	- 33 -
3.2. MATERIALE.....	- 40 -
3.3. ALTRI DATI.....	- 40 -
4. IMPLEMENTAZIONE ALL'INTERNO FILE EXCEL	- 41 -
4.1. PARAMETRI MATERIALE	- 41 -
4.2. PARAMETRI MACCHINA.....	- 42 -
4.3. COSTO ORARIO MACCHINA	- 44 -
4.4. RIPARTIZIONE COSTI MACCHINA.....	- 46 -
4.5. FATTORE CONTEMPORANEITA'	- 46 -
4.6. COSTI UNITARI.....	- 47 -
4.7. PARAMETRI COMPONENTE	- 48 -
4.8. COSTO BUILD	- 49 -
5. CASO STUDIO	- 54 -
5.1. PRESENTAZIONE COMPONENTE.....	- 54 -
5.2. SIMULAZIONE COSTO PROCESSO STAMPA	- 56 -
5.3. MODELLI DI COSTO A CONFRONTO	- 61 -
6. CONCLUSIONI.....	- 64 -
BIBLIOGRAFIA	- 66 -

INTRODUZIONE

Il Selective Laser Melting è una tecnologia di Additive Manufacturing con la quale si realizzano prodotti, aggregando polvere metallica in modo stratificato (*layer by layer*) a partire dai relativi modelli matematici tridimensionali.

Il modello CAD 3D di partenza, viene suddiviso in strati da un software integrato nel sistema di controllo della macchina; lo schema di strato guida la stampante nella deposizione del materiale. Perciò ogni layer è modellato secondo il corrispondente set di dati.

Si tratta di una tecnologia differente rispetto a quelle tradizionali, le quali normalmente procedono per sottrazione (rimozione) da un pezzo grezzo di partenza.

Malgrado il SLM possa sembrare una tecnologia nata recentemente, gli studi nell'ambito si svolgono da circa 50 anni. Le prime applicazioni risalgono agli anni '80 dove solo alcune aziende avevano possibilità di fare ricerca e sviluppo. L'incremento del capitale aziendale e lo sviluppo tecnologico hanno contribuito al progresso in questo campo [1].

Sin dai primi anni, il tempo e il costo di produzione tramite il SLM sono stati molto più elevati rispetto alle produzioni tradizionali. Tuttavia nell'ultimo periodo si è avuta una netta diminuzione anche se, tutt'ora, questo processo rimane molto dispendioso.

L'obiettivo di questa tesi è quello di creare e sviluppare un modello di costo analitico, incentrato sulla fase di Build, che possa fornire un preventivo per la durata e per il prezzo di produzione.

Nello specifico verrà effettuata una ricerca bibliografica dove si analizzeranno e studieranno i modelli di costo esistenti, in seguito si troveranno le voci di costo fondamentali nel processo produttivo, si formuleranno i rispettivi tempi di fabbricazione ed infine si effettuerà un confronto tra il modello sviluppato ed un preventivo fornito per un determinato pezzo.

1. STATO DELL'ARTE

In questo capitolo si andrà a spiegare nel dettaglio il Selective Laser Melting, illustrandone il funzionamento e gli ambiti nel quale viene utilizzato.

In seguito verrà riportata la ricerca bibliografica riguardo i modelli di costo già sviluppati, esponendone i risultati.

Questa ricerca servirà a definire le principali fasi che si susseguono nel processo e permetterà di formulare i tempi ed i costi ottenuti nel nostro modello.

1.1. SELECTIVE LASER MELTING (SLM)

Il Selective Laser Melting è una tipologia di stampa compresa nei processi di fusione a letto di polvere (PBF). Le altre tecniche PBF sono: Selective Laser Sintering (SLS), Electron Beam Melting (EBM) e il Selective Heat Sintering (SHS).

Il SLM utilizza l'energia di un raggio laser per fondere in un unico pezzo monolitico i singoli elementi di polvere, tuttavia non legandoli a livello molecolare.

Mentre il laser è in posizione fissa, uno specchio mobile, situato nella parte alta della camera di stampa, ne devia la luce così che il punto luminoso percorra

l'intera traiettoria che descrive l'oggetto. La polvere colpita si fonde con i granelli circostanti.

Conclusa la scansione del fascio laser sullo strato di polvere, la piattaforma mobile si sposta verso il basso ed un elemento con movimento orizzontale deposita un'altra superficie di polvere per lo strato successivo.

Quella non fusa viene recuperata, filtrata e riutilizzata alla fine del processo di stampa. La polvere è di tipo metallica pura, non additiva [2].

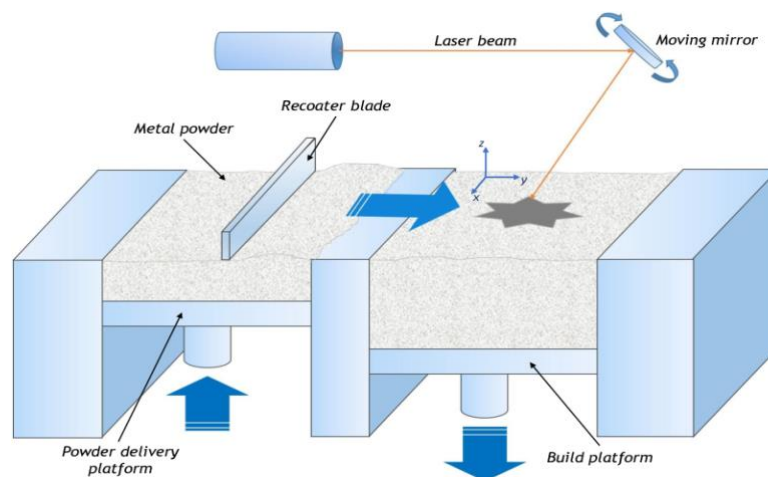


Figura 1: Illustrazione SLM

((<https://www.semanticscholar.org/paper/Cost-driven-build-orientation-and-bin-packing-of-in-Griffiths-Scanlan/01b4da25ad7526d169974e0ef42c288a5663a86d/figure/0>))

Durante la stampa, a causa delle elevate temperature che raggiungono i componenti ottenuti, possono verificarsi deformazioni e la nascita di nuove tensioni.

Per evitare questi problemi, si realizzano strutture di supporto che bloccano il pezzo alla piastra di costruzione. Quest'ultima funge da dissipatore ed impedisce al componente di deformarsi durante la stampa [3].

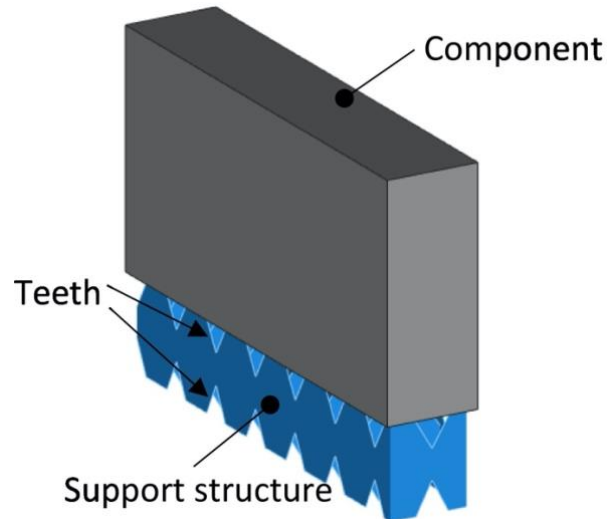


Figura 2: Componente con strutture di supporto
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127519305763>)

Tutto il processo di Build avviene dopo che la camera è stata riempita di un gas inerte (solitamente Argon) per contenere la possibile ossidazione o altre contaminazioni del materiale [4].

Il vantaggio principale del SLM è la possibilità di ottenere pezzi molto complessi, che difficilmente si otterrebbero con la tradizionale tecnica di asportazione del materiale (FDM).

Un altro importante beneficio consiste nell'utilizzare la stessa macchina per più materiali metallici.

Tra gli *svantaggi* annoveriamo:

- Costi elevati della macchina di stampa, delle polveri metalliche e del processo di stampa;
- Tempi lunghi per produrre un componente;
- Necessità di utilizzare strutture di supporto per limitare le tensioni;

- Richiesta di ulteriori trattamenti termici post-processo per ottenere il pezzo finito;
- Limitata dimensione dei pezzi finali, causata dalla ridotta grandezza della camera di stampa.

I principali impieghi del SLM sono: aereospaziale, automobilistico e biomedico [1].



Figura 3: Componente finito SLM
(<https://www.marhellabs.com/en/3d-manufacturing-processes/selective-laser-melting-slm/>)

1.2. MACCHINE DI STAMPA

I maggiori produttori di macchine per il SLM sono:

- EOS
- Concept Laser
- SLM Solution
- Renishaw

1.2.1. EOS

Società tedesca leader nella produzione.

Le macchine di stampa che verranno considerate in questo lavoro sono quelle prodotte da questa azienda, in particolare la M290, la M400 e la M400-4.

○ M290

Volume di lavoro X Y Z (mm)	250 x 250 x 325
Numero di laser	1
Potenza laser (W)	400



Figura 4: EOS M290

(<https://www.eos.info/en/additive-manufacturing/3d-printing-metal/eos-metal-systems/eos-m-290>)

○ **M400**

Volume di lavoro X Y Z (mm)	400 x 400 x 400
Numero di laser	1
Potenza laser (W)	1000



Figura 5: EOS M400

(<https://www.eos.info/en/additive-manufacturing/3d-printing-metal/eos-metal-systems/eos-m-400>)

○ **M400-4**

Volume di lavoro X Y Z (mm)	400 x 400 x 400
Numero di laser	4
Potenza laser (W)	400

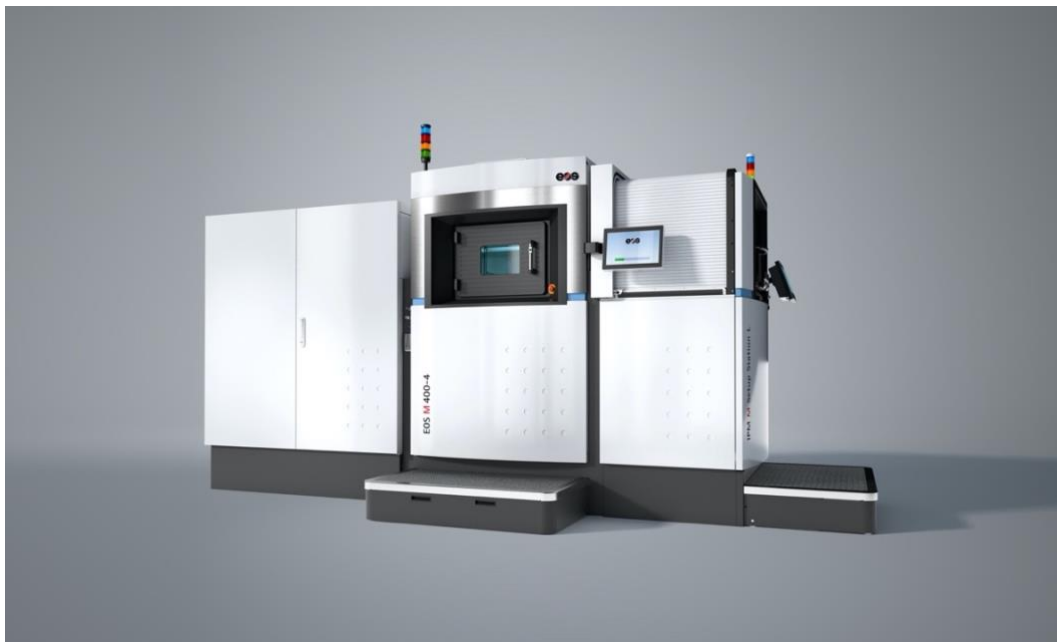


Figura 6: EOS M400-4

(<https://www.eos.info/en/additive-manufacturing/3d-printing-metal/eos-metal-systems/eos-m-400-4>)

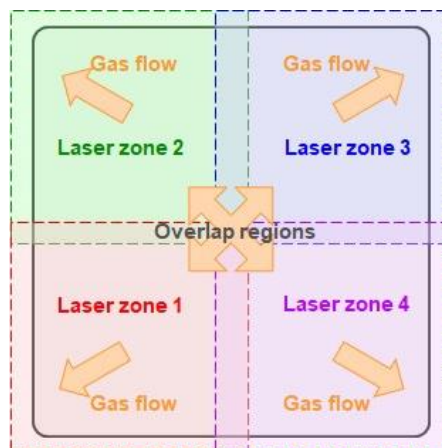


Figura 7: Suddivisione zone laser

(<https://www.linkedin.com/pulse/gone-wind-how-gas-flow-governs-lpbf-performance-marc-saunders>)

1.2.2. CONCEPT LASER

Le principali macchine prodotte sono:

- **M2 Series 5**

Si caratterizza per:

Volume di lavoro X Y Z (mm)	250 x 250 x 350
Numero di laser	1/2
Potenza laser (W)	400



Figura 8: M2 Series5
(<https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing/machines/m2series5>)

○ **X Line 2000R**

Le peculiarità sono:

Volume di lavoro X Y Z (mm)	800 x 400 x 500
Numero di laser	2
Potenza laser (W)	1000



Figura 9: X Line 2000R

(<https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing/machines/dmlm-machines/x-line-2000r>)

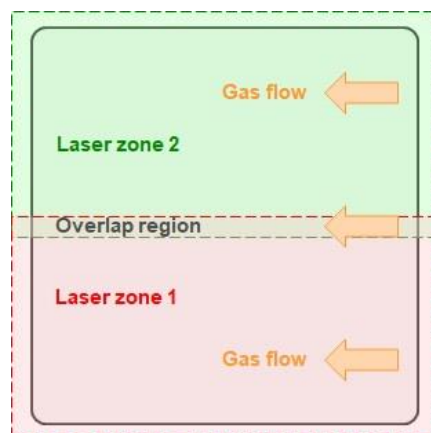


Figura 10: Suddivisione zona layer

(<https://www.linkedin.com/pulse/gone-wind-how-gas-flow-governs-lpbf-performance-marc-saunders>)

1.2.3. SLM SOLUTION

Le macchine più vendute sono la SLM 500 e la SLM 280

○ SLM 500

Volume di lavoro X Y Z (mm)	500 x 280 x 365
Numero di laser	4
Potenza laser (W)	200/700



SLM[®] 500

*Figura 11: SLM 500
(<https://www.slm-solutions.com>)*

○ **SLM 280**

Volume di lavoro X Y Z (mm)	280 x 280 x 365
Numero di laser	1/2
Potenza laser (W)	Single laser: 400/700 Dual laser: 1x700 or 1x1000 Twin laser: 400/700



SLM[®] 280

Figura 12: SLM 280
(<https://www.slm-solutions.com>)

1.2.4. RENISHAW

Questa azienda produce macchine per il SLM, che sfruttano un laser ad impulsi ad alta frequenza (mentre tutti gli altri dispositivi analizzati fino ad ora utilizzano un laser a fascio continuo). L'ultimo modello sviluppato è:

○ AM 400

Volume di lavoro X Y Z (mm)	250 x 250 x 300
Numero di laser	1
Potenza laser (W)	400



Figura 13: AM 400
(<https://www.renishaw.com/en/am-400--35456>)

1.3. RICERCA BIBLIOGRAFICA

All'inizio di questo lavoro è stata effettuata una ricerca bibliografica al fine di trovare ed analizzare tutti i modelli di costo fino ad ora sviluppati.

Innanzitutto sono state prese in considerazione delle parole chiave per indirizzare questa analisi:

- Selective Laser Melting cost estimation
- Selective Laser Melting cost analysis
- Selective Laser Melting process parameters
- Direct metal printing cost estimation
- Direct metal printing cost analysis
- Direct metal printing process parameters
- Metal additive manufacturing cost estimation
- Metal additive manufacturing cost analysis
- Metal additive manufacturing process parameters
- Additive Manufacturing cost estimation
- Additive Manufacturing cost analysis
- Additive Manufacturing process parameters

Si sono consultati i seguenti siti web:

- ◆ <https://link.springer.com>
- ◆ <https://www.scopus.com>
- ◆ <https://www.researchgate.net>
- ◆ <https://asmedigitalcollection.asme.org>
- ◆ <https://www.scientific.net>
- ◆ <https://www.cambridge.org/core/>
- ◆ <https://www.politesi.polimi.it>
- ◆ <https://library.northeastern.edu>
- ◆ <http://growingscience.com>
- ◆ <https://www.nist.gov>
- ◆ <https://www.semanticscholar.org>

Una volta analizzati tutti i documenti, i risultati di questa ricerca sono stati:

COSTO TOTALE

COSTO	FONTE
$C = C_{materiale} + C_{argon} + C_{operazioni}$	Manufacturing cost constrained topology optimization for additive manufacturing [5]
$C = C_{materiale} + C_{energia} + C_{invest. Attrezzature} + C_{lavoro}$	Cost-oriented planning of equipment for selective laser melting (SLM) in production lines [6]
$C = C_{prep} + C_{set up} + C_{costruzione} + C_{rimozione} + C_{separazione} + C_{post prod.} + C_{assemblaggio lavori costruzione}$	An integrated cost-model for selective laser melting (SLM) (doc 6)
$C = C_{prep} + C_{build job} + C_{setup} + C_{macchina} + C_{costruzione} + C_{rimozione}$	A new mixed production cost allocation model for additive manufacturing (MiProCAMAM) [7]
$C = C_{acquisto macchina} + C_{operazioni macchina} + C_{materiale} + C_{lavoro}$	Build time and cost models for additive manufacturing process selection [8]
$C = C_{macchina} + C_{materiale} + C_{post produzione} + C_{manodopera}$	Cost Estimation of Layer Additive Manufacturing using Break-down Approach [9]
$C = C_{polvere} + C_{macchina} + C_{taglio piastra} + C_{rimozioni supporti} + C_{tratt termico} + C_{prep piattaforma} + C_{test provini} + C_{finitura} + C_{trattamenti sup} + C_{controlli non distruttivi}$	Modello di analisi costi per il processo di Selective Laser Melting [10]
$C = C_{prep} + C_{setup} + C_{buildjob} + C_{costruzione} + C_{rimozione} + C_{post}$	Cost Modeling and Depreciation for Reused Powder Feedstocks in Powder Bed Fusion Additive Manufacturing [11]
$C = C_{materiale} + C_{preparazione} + C_{processo} + C_{post}$	A cost model for the economic evaluation of in-situ monitoring tools in metal additive manufacturing [12]
$C = C_{pre} + C_{buildjob} + C_{post}$	Comparative costs of additive manufacturing VS machining: the case study of the production of forming dies for tube bending [13]
$C = C_{macchina} + C_{materiale} + C_{lavoro} + C_{post}$	Implementation of Additive Manufacturing Cost Estimation Tool (AMCET) Using Break-down Approach [14]
$C = C_{pre} + C_{costruzione} + C_{post}$	Ottimizzazione strutturale di componenti per la produzione con tecnologie di Additive Manufacturing [2]
$C = C_{pre} + C_{materiale} + C_{costruzione} + C_{post}$	A Cost Breakdown and Production Uncertainty Analysis of Additive Manufacturing [15]
$C = C_{materiale} + C_{trasporto} + C_{energia per processo} + C_{energia per setup} + C_{energia durante trasporto} + C_{occupazione macchina durante processo} + C_{occupazione macchina durante setup}$	A cloud service platform integrating additive and subtractive manufacturing with high resource efficiency [16]
$C = C_{materiale} + C_{acquisto macchina} + C_{funzionamento macchina} + C_{lavoro} + C_{ausiliario}$	Economic comparison of selective laser melting and conventional subtractive manufacturing processes [17]
$C = C_{pre} + C_{buildjob} + C_{setup} + C_{build} + C_{rimozione} + C_{separazione} + C_{post}$	Cost models of additive manufacturing: A literature review [18]
$C = C_{materiale} \times M_{massa} + C_{indiretto} \times T_{costruzione}$	Costs and Cost Effectiveness of Additive Manufacturing [19]

Nella tabella appena inserita viene riportata la formulazione del costo totale di ogni modello analizzato. Le equazioni non sono tutte uguali poiché i parametri presenti all'interno di queste variano a seconda dell'obiettivo dell'autore ed in base alle fasi esaminate.

COSTO BUILD

COSTO	FONTE
$C_{build} = T_{costr} \times (C_{macchina/h} + C_{gas/h}) + V_{volume\ materiale} \times C_{materiale}$	An integrated cost-model for selective laser melting (SLM) [20]
$C_{build} = T_{costr} \times (C_{macchina/h} + (C_{gas/h} \times G_{gas\ consumato}) + (C_{energia} \times P_{consumo\ potenza} \times K_{fattore\ utilizzo}) + M_{massa\ geometria} \times (C_{materiale} \times W_{fattore\ spreco\ polvere}))$	A new mixed production cost allocation model for additive manufacturing (MiProCAMAM) [7]
$C_{build} = C_{macchina\ durante\ funzionamento} + C_{materia\ fusa\ nel\ processo} + C_{materia\ non\ fusa\ nel\ processo}$	Cost Modeling and Depreciation for Reused Powder Feedstocks in Powder Bed Fusion Additive Manufacturing [11]
$C_{build} = ((C_{energia} + C_{gas} + C_{sistema}) \times T_{costruzione}) / N_{parti}$	A cost model for the economic evaluation of in-situ monitoring tools in metal additive manufacturing [12]
$C_{build} = T_{costruzione} \times C_{orario\ macchina}$	Self-learning calculation for Selective Laser Melting [21]
$C_{build} = C_{indiretto} \times T_{costr.} + W_{kg\ pezzo} \times P_{prezzo\ materiale} + E_{costr.} \times P_{prezzo\ energia}$	Ottimizzazione strutturale di componenti per la produzione con tecnologie di Additive Manufacturing [2]
$C_{build} = T_{costr} \times (C_{macchina/h}) + C_{indiretti} + C_{elementi\ consumabili}$	A Cost Breakdown and Production Uncertainty Analysis of Additive Manufacturing [15]
$C_{build} = (C_{indiretto} \times T_{costruzione}) + (M_{massa\ totale} \times C_{materiale}) + (E_{energia\ consumata} + C_{energia})$	Cost models of additive manufacturing: A literature review [18]
$C_{build} = C_{indiretto} + C_{diretto}$	Cost Modelling of Additive Manufacturing/ 3D-Printing Technologies [22]
$C_{build} = (C_{indiretto} \times T_{costruzione}) + (M_{massa\ totale} \times C_{materiale}) + (E_{energia\ consumata} + C_{energia})$	Cost Estimation of Laser Additive Manufacturing of Stainless Steel [23]
$C_{build} = C_{progettazione} + C_{cavità\ stampo} + C_{guide}$	Economics of additive manufacturing for end-usable metal parts [24]
$C_{build} = (C_{indiretto} \times T_{costruzione}) + (M_{massa\ totale} \times C_{materiale}) + (E_{energia\ consumata} + C_{energia})$	ADDITIVE MANUFACTURING: Cost and Lead Time Estimation, Benefits and Challenges [25]

Nel prospetto precedente sono riportati tutti i metodi utilizzati negli articoli per determinare il costo della fase di Build. Anche in questo caso la differenza tra un'equazione e quella successiva è data dallo scopo dell'autore e dall'analisi che ha effettuato. Questa tabella è fondamentale per il modello di costo che si andrà a sviluppare, perché permette di confrontare ed analizzare tutti i fattori, ed i tempi, che costituiscono questa fase.

COSTO PRE-BUILD

COSTO	FONTE
$C_{prep} = (C_{operatore/h} + C_{workstation/h}) \times (T_{preparazione}/N_{quantità})$	An integrated cost-model for selective laser melting (SLM) [20]
$C_{prep} = (C_{operatore\ pre-opera} + C_{workstation}) \times (T_{preparazione})/N_{parti}$	A new mixed production cost allocation model for additive manufacturing (MiProCAMAM) [7]
$C_{prep} (conf\ macchina) = (T_{caricamento\ macc} + T_{imp\ parametri} + T_{generazione\ STL} + T_{regolazione\ macchina\ primo\ avvio}) \times C_{operatore/h}$	Cost Estimation of Layer Additive Manufacturing using Break-down Approach[9]
$C_{prep} = C_{lavoro\ prep} + C_{setup}$	A cost model for the economic evaluation of in-situ monitoring tools in metal additive manufacturing [12]
$C_{prep} = C_{attrezzatura} + C_{general\ costruzione}$	Comparative costs of additive manufacturing VS. machining: the case study of the production of forming dies for tube bending [13]
$C_{prep} = C_{personale} + C_{op.machina}$	Ottimizzazione strutturale di componenti per la produzione con tecnologie di Additive Manufacturing [2]
$C_{pre} = T_{pre} \times (C_{operatore/h} + C_{costo\ orario\ compresi\ tutti\ gli\ strumenti\ necessari\ per\ la\ prep.})$	A Cost Breakdown and Production Uncertainty Analysis of Additive Manufacturing [15]

In questa tabella vengono mostrate tutte le espressioni che riguardano il costo della fase di Pre-Build.

COSTO POST-BUILD

COSTO	FONTE
$C_{post} = T_{post} \times (C_{operatore/h} + C_{operazioni\ post\ prod/h})$	An integrated cost-model for selective laser melting (SLM) [20]
$C_{post} = C_{materiale\ post\ processo} + C_{lavoro\ post\ produzione}$	Cost Estimation of Layer Additive Manufacturing using Break-down Approach[9]
$C_{post} = (T_{post} \times (C_{operatore/h} + C_{macchina/h}))$	Cost Modeling and Depreciation for Reused Powder Feedstocks in Powder Bed Fusion Additive Manufacturing [11]
$C_{post} = C_{rimozione\ da\ macchina} + C_{rimozione\ piastra} + C_{ispezione\ qualità}$	A cost model for the economic evaluation of in-situ monitoring tools in metal additive manufacturing [12]
$C_{post} = C_{attrezzatura\ post} + C_{generale}$	Comparative costs of additive manufacturing VS. machining: the case study of the production of forming dies for tube bending [13]
$C_{post} = C_{personale} + C_{distensione} + C_{elettroerosione} + C_{asportazione\ truciolo} + C_{rettifica}$	Ottimizzazione strutturale di componenti per la produzione con tecnologie di Additive Manufacturing [2]
$C_{post} = T_{post} \times (C_{operatore/h} + C_{costo\ orario\ compresi\ tutti\ gli\ strumenti\ necessari\ per\ la\ post.})$	A Cost Breakdown and Production Uncertainty Analysis of Additive Manufacturing [15]
$C_{post} = C_{trattamento\ termico} + C_{oper\ lavorazioni}$	Economics of additive manufacturing for end-usable metal parts [24]

In quest'ultimo elenco si sono inserite tutte le equazioni che riguardano la fase di Post-Build.

2. MODELLO DI COSTO

Fino a questo momento si è posta l'attenzione nell'analizzare e nell'apprendere tutte le fasi del processo di stampa, in particolare il Pre-Build, il Build ed il Post Build.

In questo capitolo ci si concentrerà sullo studio e sullo sviluppo del modello di costo per il singolo processo di Build. Verranno riportati tutti i tempi di svolgimento, per poi procedere a scrivere le voci di costo che lo caratterizzano.

2.1. TEMPI DEL PROCESSO BUILD

Prima di procedere al calcolo dei tempi di stampa, occorre conoscere l'altezza (ComponentSizeZ), il volume ed il volume dei supporti del componente.

Inoltre è importante sapere che la densità del volume di supporto è del 20% rispetto a quella del pezzo [5].

Per quanto concerne la fase di Build, i tempi che la compongono sono:

- **COATING TIME**
- **SCANNING TIME**

Il *Coating Time* viene così calcolato:

$$\frac{\text{NumberOfLayers} * \text{MachineRecoatingTime}}{60}$$

Per lo *Scanning Time* si ha:

$$\frac{\left(\frac{\text{TotalScanningPath} * \text{LaserLinearEnergyDensity}}{\text{MachineLaserPower} * \text{MachineLasers} * \text{MachineLasersContemporaneityFactor}} \right)}{60}$$

Il calcolo di quest'ultimo è vincolato dalla determinazione del **Total Scanning Path (mm)**.

Per definire questo parametro bisogna, per prima cosa, tenere in considerazione questi valori:

- ◆ **Layer Thickness (μm)**: spessore di uno strato solidificato;
- ◆ **Hatch Distance (mm)**: distanza tra due passate successive di uno stesso layer. La formula per calcolarlo è:

$$\text{MachineLaserFocusDiameter} * (1 - \text{Overlap Rate})$$

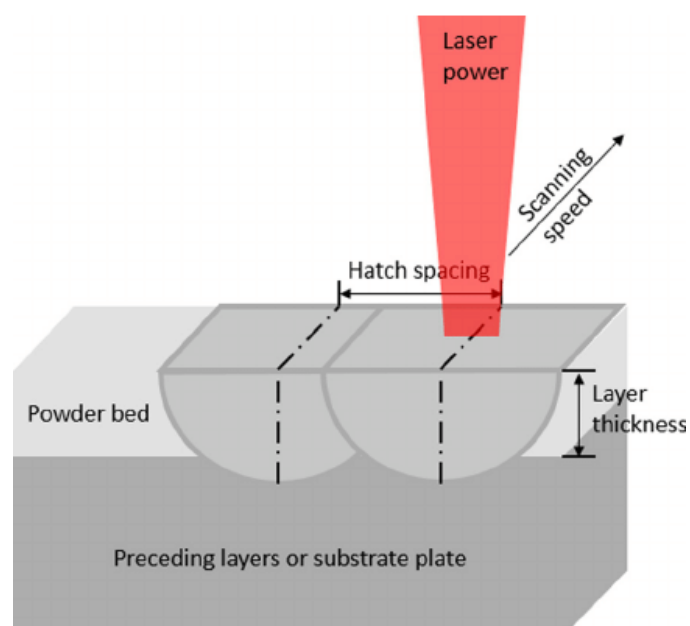


Figura 14: Layer Thickness ed Hatch Distance
(https://www.researchgate.net/figure/SLM-process-parameters-laser-power-scanning-speed-hatch-spacing-and-layer-thickness_fig2_286497734/download)

- ◆ **Distance Between Plate and Piece (mm)**: distanza tra faccia superiore della piastra e la parte inferiore del pezzo. Questo spazio non è vuoto ma è occupato da materiale di supporto.
- ◆ **Number Of Layer**: numero di strati necessari per costruire il pezzo. L'equazione per ricavare questo parametro è:

$$\frac{(\text{ComponentSizeZ} + \text{DistanceBetweenPlateAndPiece})}{(\text{LayerThickness} * 0,001)}$$

- ◆ **Overlap Rate [26]**: fattore di ricoprimento tra due passate successive. Valore compreso tra 0 e 30%. Nel modello di costo sviluppato successivamente, sarà pari al 20%.

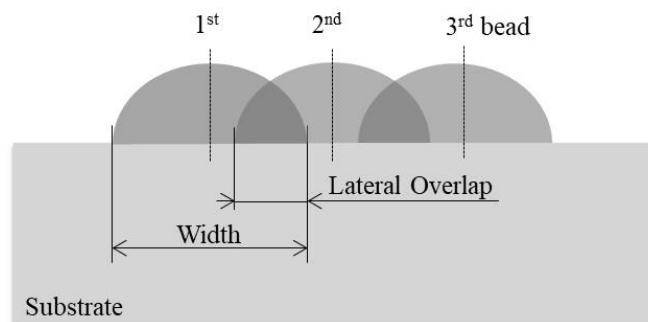


Figura 15: Overlap Rate
https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-92242017000400466

- ◆ **Laser Linear Energy Density (J/mm)**: densità di energia lineare del laser. Si calcola dividendo la potenza del laser con la velocità di Scanning;

- ◆ **Number Of Perimetral Passes [10]**: Numero di volte che il laser deve passare sullo stesso perimetro.

A seguire si calcolano il **Middle Path** e l'**Average Path Perimeter Each Layer**.

Per il primo:

- Volume Each Layer (mm³) = $\frac{\text{ComponentVolume} + \text{SupportVolume}}{\text{NumberOfLayer}}$
- Medium Area (mm²) = $\frac{\text{VolumeOfEachLayer}}{(\text{LayerThickness} * 0,001)}$
- **Middle Path (mm)** = $\frac{\text{MediumArea}}{\text{HatchDistance}}$

Per il secondo si considera un cerchio avente l'area equivalente a quella del componente:

- Equivalent Area (mm²) = $\frac{(\text{SupportVolume} + \text{ComponentVolume})}{\text{ComponentSizeZ}}$
- Equivalent Diameter (mm) = $\sqrt{\frac{4 * \text{EquivalentArea}}{\pi}}$
- **Average Path Perimeter Each Layer (mm)** = $\pi * \text{EquivalentDiameter} * \text{NumberOfPerimetralPasses}$

Quindi, il **Total Scanning Path** è uguale a:

$$(\text{MiddlePath} + \text{AveragePathPerimeterEachLayer}) * \text{NumberOfLayers}$$

Oltre lo Scanning Time ed il Coating Time, che costituiscono la fase di Build, si considerano:

- Time SetUp Machine (min)
- Build Plate Load Time (min)
- Plate WarmUp Time (min)
- Cool Down Time (min)
- Powder And Plate Removal Time (min).

I primi tre sono tempi, e quindi azioni, che avvengono prima della stampa, mentre gli ultimi due si svolgono dopo il Build.

2.2. COSTO DEL PROCESSO BUILD

Il costo generato dal modello è dato dalla SOMMA di:

- ◆ *Material Cost* (€)
- ◆ *Machine Cost* (€)
- ◆ *Labour Cost* (€)
- ◆ *Consumable Cost* (€)
- ◆ *Energy Cost* (€)
- ◆ *Equipment Cost* (€)

Quindi:

$$C_{TOT} = C_{Material} + C_{Machine} + C_{Labour} + C_{Consumable} + C_{Energy} + C_{Equipment}$$

2.2.1. MATERIAL COST

L'equazione per il calcolo del costo del materiale è:

$$C_{Material} = C_{NetMaterial} + C_{WasteMaterial}$$

Dove:

- **Net Material Cost** = Component Weight * ComponentCost

Rappresenta il materiale netto usato nel processo di stampa.

- **Waste Material Cost** = ComponentWeight * ComponentCost * WasteMaterial

Descrive il materiale perso durante il Build.

Il Waste Material è del 14% rispetto alla polvere utilizzata [27].

Il **Compent Weight** si ricava:

$$(\text{ComponentVolume} * \text{ComponentDensity}) + (\text{SupportVolume} * \text{SupportDensity})$$

2.2.2. MACHINE COST

Per il costo della macchina si ha:

$$C_{Machine} = C_{MachineSetup} + C_{MachineOperation} + C_{MachineIdle}$$

Quindi sono stati considerati:

- **Machine SetUp Cost** = $\frac{\left(\left(\frac{\text{SetUpTime}}{60}\right) * \text{MachineUnitaryCost}\right)}{\text{ComponentBatchQuantity}}$

Questa formula mostra i costi relativi al SetUp della macchina.

- **Machine Operation Cost =**

$$\left(\frac{\text{BuildScanningTime} + \text{BuildCoatingTime}}{60} \right) * \text{MachineUnitaryCost}$$

Sono i costi di funzionamento della macchina durante il processo di Build

- **Machine Idle Cost =**

$$\frac{\left(\frac{\text{BuildPlateLoadTime} + \text{BuildPlateWarmUp} + \text{BuildPlaceCoolDown} + \text{PowderAndPlateRemovalTime}}{60} \right) * \text{MachineunitaryCost}}{\text{ComponentBatchQuantity}}$$

Rappresenta i costi imposti dalla macchina durante l'inattività, cioè prima e dopo il Build.

2.2.3. LABOUR COST

Il costo della manodopera è:

$$C_{Labour} = C_{LabourSetUp} + C_{LabourOperation} + C_{LabourIdle}$$

In questa formula sono stati considerati:

- **Labour SetUp Cost =** $\frac{\left(\frac{\text{SetUpTime}}{60} \right) * \text{LabourUnitaryCost}}{\text{ComponentBatchQuantity}}$

Viene calcolato il costo della manodopera per il processo di SetUp.

Questo si riferisce al singolo componente poiché il prezzo totale è stato

diviso per il numero di componenti stampati contemporaneamente all'interno della stessa camera.

- **Labour Operation Cost** =
$$\frac{\left(\frac{\text{BuildPlateLoadTime} + \text{PowerAndPlateRemovalTime}}{60}\right) * \text{LabourUnitaryCost}}{\text{ComponentBatchQuantity}}$$

Mostra i costi dovuti alla manodopera sostenuti per il caricamento della piastra e per la rimozione del pezzo e della piastra dalla macchina.

- **Labour Idle Cost** =
$$\frac{\left(\frac{\text{BuildTime} + (\text{BuildPlateWarmUpTime} + \text{BuildPlateCoolDownTime})}{\text{ComponentBatchQuantity}}\right)}{60} * \frac{\text{LabourUnitaryCost}}{\text{LabourControlledMachinesQuantity}}$$

Descrive i costi della manodopera dovuti al processo di Build, di WarmUp e CoolDown.

2.2.4. CONSUMABLE COST

L'equazione per il costo dei consumabili è:

$$C_{Consumable} = C_{ConsumableSolid} + C_{ConsumableLiquid} + C_{ConsumableGas}$$

Nel processo di SLM, gli unici consumabili che si trovano sono quelli gassosi.

In particolare, per questa voce, si ha l'aria compressa ed il gas inerte.

Quindi:

- **Consumable Gas Cost** =
$$\frac{(\text{CompressedAirCost} + \text{InertGasCost})}{\text{ComponentBatchQuantity}}$$

Il **costo del gas inerte**, cioè l'Argon, si calcola:

- Inert Gas Unitary Consumption ($Nm^3/hour$) = $\left(\frac{MachineInertGasConsumption}{1000}\right) * 60$
- Inert Gas Usage Time ($hour$) = $\frac{(BuildPlateWarmUpTime + BuildCoatingTime + BuildScanningTime + BuildPlateCoolDownTime)}{60}$
- Inert Gas Volume Used (Nm^3) = $InertGasUnitaryConsumption * InertGasUsageTime$
- **Inert Gas Cost (€)** = $ArgonUnitaryCost * InertGasVolumeUsed$

Invece per il **costo dell'aria compressa** si ha:

- Compressed Air Unitary Consumption ($Nm^3/hour$) = $\left(\frac{\left(\left(\frac{MachineCompressedAirConsumption}{1000}\right) * MachineCompressedAirPressure + 100000\right)}{101000}\right) * 60$
- Compressed Air Usage Time ($hour$) = $\frac{(BuildCoatingTime + BuildScanningTime + BuildPlateWarmUpTime + BuildPlateCoolDownTime)}{60}$
- Compressed Air Consumption (Nm^3) = $CompressedAirUsage * CompressedAirUnitaryConsumption$
- **Compressed Air Cost (€)** = $CompressedAirConsumption * CompressedAirUnitaryCost$

2.2.5. ENERGY COST

Il costo dell'energia è dato da:

$$C_{Energy} = C_{EnergyMachine} + C_{EnergyLabour} + C_{EquipmentCost}$$

L'energia spesa per la manodopera e per l'attrezzatura sono pari a zero.

Quindi il costo complessivo è dato dall'energia consumata dalla macchina:

○ Energy Usage Time (*hour*) =

$$\frac{(BuildPlateWarmUpTime + BuildCoatingTime + BuildScanningTime + BuildPlateCoolDownTime)}{60}$$

○ Energy Cost WarmUp (€) =

$$\left(\frac{(BuildPlateWarmUp)}{60} \right) * MachineWarmUpPower * PriceEnergy$$

○ Energy Cost Build (€) =

$$\left(\frac{(BuildCoatingTime + BuildScanningTime)}{60} \right) * MachineBuildPower * priceEnergy$$

○ Energy Cost Cool Down (€) =

$$\left(\frac{(BuilPlateCoolDownTime)}{60} \right) * MachineCoolDownPower * PriceEnergy$$

Quindi il costo dell'energia consumata dalla macchina è dato da:

$$C_{EnergyMachine} = C_{EnergyWarmUp} + C_{EnergyBuild} + C_{EnergyCoolDown}$$

2.2.6. EQUIPMENT COST

Il costo delle attrezzature è ottenuto da:

$$C_{\text{Equipment}} = C_{\text{EquipmentInitial}} + C_{\text{EquipmentMaintenance}}$$

Non utilizzando attrezzature al di fuori della macchina, il cui costo è stato già analizzato, questo parametro è pari a zero nel processo di Build.

3. DATABASE

Per creare e realizzare il modello di costo è stato necessario raccogliere tutti quei dati che stanno alla base della formulazione di tempi e delle spese economiche. Si è costruito così un database che comprende:

3.1. MACCHINE DI STAMPA

Come detto precedentemente, in questo modello di costo si sono considerate le macchine EOS M290, EOS M400 e la EOS M400-4.

Entrando nel dettaglio, i dati di base raccolti per lo sviluppo delle equazioni sono stati:

- *Plate width (mm), Plate lenght (mm), Building height (mm)*: larghezza, lunghezza ed altezza della camera di stampa;
- *Price (€)*: prezzo di acquisto della macchina;
- *Gas Consumption (liters/minute @ 1 bar)*: gas inerte consumato
- *Compressed air pressure (bar)*: pressione aria compressa nella macchina;
- *Compressed air consumption (liter/minute)*: aria compressa consumata durante attività macchina;

- *Annual Maintenance cost (€/year)*: costo annuale di manutenzione;
- *Building area (mm²)*: area di costruzione;
- *Recoating time (seconds)*: tempo di Recoating della macchina;
- *Focus Diameter (mm)*: Diametro focale del laser;
- *Laser Power (Watt)*: potenza del laser;
- *Number of laser*: numero di laser;
- *WarmUp power (kWatt)*: potenza consumata dalla macchina durante la fase di WarmUp;
- *Build power (kWatt)*: potenza consumata durante processo di Build;
- *Cool down power (kWatt)*: potenza consumata nella fase di Cool Down;
- *Contemporaneity factor*: fattore di contemporaneità dipendente dal numero di laser;
- *WarmUp time (min)*: tempo di riscaldamento macchina;
- *CoolDown time (min)*: tempo di raffreddamento macchina e pezzo;
- *SetUp time (min)*: tempo impiegato per caricare o cambiare la polvere nella macchina e caricamento file CAD;
- *Build plate load time (min)*: tempo caricamento della piastra;
- *Build plate unload powder removal time (min)*: Tempo impiegato per togliere la piastra (e quindi il pezzo costruito) e pulire la macchina dalla polvere residua.

EOS M290

Machine name	Parameter	Value	Unit of measure	Source
EOS-M290	Plate width	250	mm	Machine datasheet
EOS-M290	Plate length	250	mm	Machine datasheet
EOS-M290	Building height	325	mm	Machine datasheet
EOS-M290	Price	€ 480.000	€	Estimation
EOS-M290	Gas consumption	3	liters/minute @1bar	Machine datasheet
EOS-M290	Compressed air pressure	6	bar	Machine datasheet
EOS-M290	Compressed air consumption	50	liter/minute	Machine datasheet
EOS-M290	Annual maintenace cost	€ 22.000	€/year	Ruffo et al. [28]
EOS-M290	Building area	27	m ²	Estimation
EOS-M290	Recoating time	6	seconds	Modello di analisi costi per il processo di Selective Laser Melting [10]
EOS-M290	Focus Diameter	0,1	mm	Catalogo
EOS-M290	LaserPower	400	W	Catalogo
EOS-M290	Warm up power	2,52	kW	Gebbe 2015 [29]
EOS-M290	Build power	2,63	kW	Gebbe 2015 [29]
EOS-M290	Cool down power	0,36	kW	Gebbe 2015 [29]
EOS-M290	Number of Laser	1	-	Machine datasheet
EOS-M290	Contemporaneity factor	100%	%	Vedere foglio "Fattore di contemporaneità"
EOS-M290	WarmupTime	30	minutes	Vedere foglio "Warm up - Cool down"
EOS-M290	CoolDownTime	30	minutes	Vedere foglio "Warm up - Cool down"
EOS-M290	SetupTime	90	minutes	Vedere foglio "Warm up - Cool down"
EOS-M290	BuildPlateLoadTime	30	minutes	Vedere foglio "Warm up - Cool down"
EOS-M290	BuildPlateUnloadPowderRemovalTime	30	minutes	Vedere foglio "Warm up - Cool down"

EOS M400

Machine name	Parameter	Value	Unit of measure	Source
EOS-M400	Plate width	400	mm	Machine datasheet
EOS-M400	Plate length	400	mm	Machine datasheet
EOS-M400	Building height	400	mm	Machine datasheet
EOS-M400	Price	€ 1.250.000	€	Estimation
EOS-M400	Gas consumption	7	liters/minute @1bar	Machine datasheet
EOS-M400	Compressed air pressure	7	bar	Machine datasheet
EOS-M400	Compressed air consumption	333	liter/minute	Machine datasheet
EOS-M400	Annual maintenace cost	€ 55.000	€/year	Ruffo et al. [28]
EOS-M400	Building area	55	m ²	Estimation
EOS-M400	Recoating time	13	seconds	Modello di analisi costi per il processo di Selective Laser Melting [10]
EOS-M400	Focus Diameter	0,09	mm	Catalogo
EOS-M400	LaserPower	1000	W	Catalogo
EOS-M400	Warm up power	9,32	kW	Estimation
EOS-M400	Build power	9,73	kW	Estimation
EOS-M400	Cool down power	1,33	kW	Estimation
EOS-M400	Number of Laser	1	-	Machine datasheet
EOS-M400	Contemporaneity factor	100%	%	Vedere foglio "Fattore di contemporaneità"
EOS-M400	WarmupTime	60	minutes	Vedere foglio "Warm up - Cool down"
EOS-M400	CoolDownTime	90	minutes	Vedere foglio "Warm up - Cool down"
EOS-M400	SetupTime	180	minutes	Vedere foglio "Warm up - Cool down"
EOS-M400	BuildPlateLoadTime	60	minutes	Vedere foglio "Warm up - Cool down"
EOS-M400	BuildPlateUnloadPowderRemovalTime	90	minutes	Vedere foglio "Warm up - Cool down"

EOS M400-4

Machine name	Parameter	Value	Unit of measure	Source
EOS-M400-4	Plate width	400	mm	Machine datasheet
EOS-M400-4	Plate length	400	mm	Machine datasheet
EOS-M400-4	Building height	400	mm	Machine datasheet
EOS-M400-4	Price	€ 1.450.000	€	Estimation
EOS-M400-4	Gas consumption	7	liters/minute @1bar	Machine datasheet
EOS-M400-4	Compressed air pressure	7	bar	Machine datasheet
EOS-M400-4	Compressed air consumption	333	liter/minute	Machine datasheet
EOS-M400-4	Annual maintenace cost	€ 64.000	€/year	Ruffo et al. [28]
EOS-M400-4	Building area	55	m ²	Estimation
EOS-M400-4	Recoating time	13	seconds	Modello di analisi costi per il processo di Selective Laser Melting [10]
EOS-M400-4	Focus Diameter	0,1	mm	Catalogo
EOS-M400-4	LaserPower	400	W	Catalogo
EOS-M400-4	Warm up power	15,12	kW	Estimation
EOS-M400-4	Build power	15,78	kW	Estimation
EOS-M400-4	Cool down power	2,16	kW	Estimation
EOS-M400-4	Number of Laser	4	-	Machine datasheet
EOS-M400-4	Contemporaneity factor	75%	%	Vedere foglio "Fattore di contemporaneità"
EOS-M400-4	WarmupTime	60	minutes	Vedere foglio "Warm up - Cool down"
EOS-M400-4	CoolDownTime	90	minutes	Vedere foglio "Warm up - Cool down"
EOS-M400-4	SetupTime	180	minutes	Vedere foglio "Warm up - Cool down"
EOS-M400-4	BuildPlateLoadTime	60	minutes	Vedere foglio "Warm up - Cool down"
EOS-M400-4	BuildPlateUnloadPowderRemovalTime	90	minutes	Vedere foglio "Warm up - Cool down"

Oltre questi valori, si è definito il costo orario:

- *Printer*: Stampante selezionata;
- *Price (€)*: Prezzo acquisto macchina di stampa;
- *Annual maintenance cost (€/year)*: costo manutenzione annuale;
- *Depreciation time (year)*: tempo di ammortamento vale 5 anni;
- *Building area (mm²)*: area di costruzione;
- *Discount rate*: tasso di sconto pari all'8%;
- *Building yearly rent rate (€/m²/year)*: tasso di affitto annuo edificio;
- *Machine discounted cost (€)*: costo macchina si calcola:

$$\text{Price} * (1 + \text{DepreciationTime} * \text{DiscountRate})$$

- *Load factor*: fattore di carico pari al 57%;
- *Working time (hour)*: tempo di lavoro in un anno della macchina. È dato da:

$$= (365*24) * \text{LoadFactor};$$

- *Depreciation hourly rate (€/hour)*: tariffa oraria ammortamento così calcolata:

$$\frac{\left(\frac{\text{MachineDiscountedCost}}{\text{DepreciationTime}} \right)}{\text{WorkingTime}}$$

- *Maintenance hourly rate (€/hour)*: tariffa oraria di manutenzione data da:

$$\frac{\text{AnnualMaintenanceCost}}{\text{WorkingTime}}$$

- *Production overhead hourly rate (€/hour)*: tariffa oraria generale di produzione. Si ricava:

$$\frac{(\text{BuildingYearlyRentRate} * \text{BuildingArea})}{\text{WorkingTime}}$$

- *Costo orario macchina (€/hour) =*

$$\text{DepreciationHourly} + \text{MaintenanceHourlyRate} + \text{ProductionOverheadRate}$$

Name	Value	Unit of measure	Source
Printer	EOS-M290		
Price	480.000	€	
Annual maintenace cost	22.000	€/year	
Depreciation time	5	years	
Discount rate	8%	%	
Building area	€ 27	m2	
Building yearly rent rate	€ 130	€/m2/year	Ruffo et al.
Machine discounted cost	672.000	€	
Load factor	57%		Ruffo et al.
Working time	4993	h	
Depreciation hourly rate	€ 26,92	€/h	
Maintenance hourly rate	€ 4,41	€/h	
Production overhead hourly rate	€ 0,70	€/h	
Costo orario macchina	€ 32,03	€/h	

[28]

3.2. MATERIALE

Per il materiale si sono considerati:

GUID	Density (kg/mm ³)	Cost [€/Kg]	Layer thickness (μm)	Laser Linear Energy Density (J/mm)	Source
AlSi10Mg	0,0000267	63	40	0,21	[30] [31]
INCONEL718	0,0000819	104	40	0,30	[32][33]
INCONEL625	0,0000844	105	40	0,22	[34]
316L	0,000079	50	40	0,22	[35][36][37]
Maraging steel	0,000081	78	30	0,30	[38]
AlSi7Mg0,6	0,0000267	62,5	30	0,14	[39]
17-4PH	0,000078	52,5	20	0,11	[40]
CoCrF75	0,000083	125	30	0,15	[41]
Ti Gr1	0,000045	250	50	0,35	[42]
Ti6Al4V (Gr5)	0,0000442	293	20	0,32	[43][44][45]
Ti6Al4V (Gr23)	0,0000445	350	20	0,32	[43][44][45]
Copper	0,0000896	120	50	1,37	[46]
16MnCr5	0,0000785	40	50	0,35	[47]

3.3. ALTRI DATI

Altri elementi fondamentali per sviluppare il modello di costo sono:

- **Labor unitary cost = 35 €/hour**
- **Labour controlled machines quantity = 5**
- **Argon unitary cost = 17,7 €/Nm³**
- **Price energy = 0,2 €/kWh [48]**
- **Compressed air unitary cost = 0,025 €/Nm³**
- **Component per build:** numero di pezzi che vengono stampati contemporaneamente

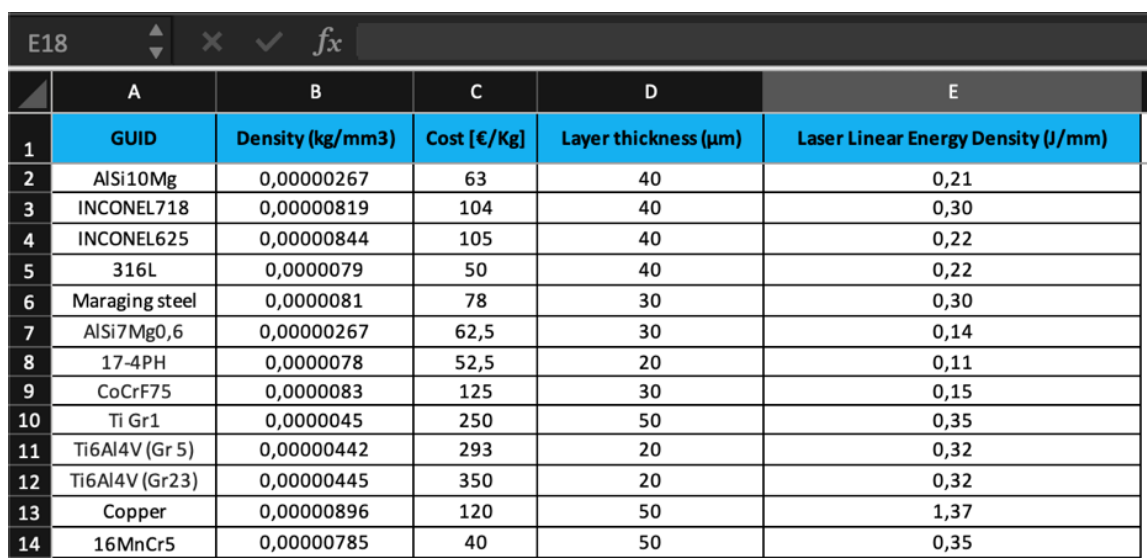
4. IMPLEMENTAZIONE ALL'INTERNO FILE EXCEL

Il modello di costo spiegato fino ad ora, è stato costruito e sviluppato all'interno del programma Excel.

Questa scelta è stata effettuata per la semplicità di utilizzo e per l'accuratezza a cui si può giungere.

Per prima cosa si sono importati tutti i dati del database:

4.1. PARAMETRI MATERIALE



	A	B	C	D	E
	GUID	Density (kg/mm3)	Cost [€/Kg]	Layer thickness (µm)	Laser Linear Energy Density (J/mm)
1					
2	AlSi10Mg	0,00000267	63	40	0,21
3	INCONEL718	0,00000819	104	40	0,30
4	INCONEL625	0,00000844	105	40	0,22
5	316L	0,0000079	50	40	0,22
6	Maraging steel	0,0000081	78	30	0,30
7	AlSi7Mg0,6	0,00000267	62,5	30	0,14
8	17-4PH	0,0000078	52,5	20	0,11
9	CoCrF75	0,0000083	125	30	0,15
10	Ti Gr1	0,0000045	250	50	0,35
11	Ti6Al4V (Gr 5)	0,00000442	293	20	0,32
12	Ti6Al4V (Gr23)	0,00000445	350	20	0,32
13	Copper	0,00000896	120	50	1,37
14	16MnCr5	0,00000785	40	50	0,35

Figura 16: Tabella materiali

In quest'immagine si può vedere come sono stati scritti tutti i materiali con le loro peculiarità.

Come visto in precedenza, sono fondamentali al fine dei calcoli e non variano in relazione alla tipologia di macchina utilizzata.

4.2. PARAMETRI MACCHINA

	A	B	C	D	E
1	GUID	Machine name	Parameter	Value	Unit of measure
2	EOS-M290	EOS-M290	Plate width	250	mm
3	EOS-M290	EOS-M290	Plate length	250	mm
4	EOS-M290	EOS-M290	Building height	325	mm
5	EOS-M290	EOS-M290	Price	€ 480.000	€
6	EOS-M290	EOS-M290	Gas consumption	3	liters/minute @1bar
7	EOS-M290	EOS-M290	Compressed air pressure	6	bar
8	EOS-M290	EOS-M290	Compressed air consumption	50	liter/minute
9	EOS-M290	EOS-M290	Annual maintenance cost	€ 22.000	€/year
10	EOS-M290	EOS-M290	Building area	27	m2
11	EOS-M290	EOS-M290	Recoating time	6	seconds
12	EOS-M290	EOS-M290	Focus Diameter	0,1	mm
13	EOS-M290	EOS-M290	LaserPower	400	W
14	EOS-M290	EOS-M290	Warm up power	2,52	kW
15	EOS-M290	EOS-M290	Build power	2,63	kW
16	EOS-M290	EOS-M290	Cool down power	0,36	kW
17	EOS-M290	EOS-M290	Number of Laser	1	-
18	EOS-M290	EOS-M290	Contemporaneity factor	100%	%
19	EOS-M290	EOS-M290	WarmupTime	30	minutes
20	EOS-M290	EOS-M290	CoolDownTime	30	minutes
21	EOS-M290	EOS-M290	SetupTime	90	minutes
22	EOS-M290	EOS-M290	BuildPlateLoadTime	30	minutes
23	EOS-M290	EOS-M290	BuildPlateUnloadPowderRemovalTime	30	minutes
24					
25	EOS-M400	EOS-M400	Plate width	400	mm
26	EOS-M400	EOS-M400	Plate length	400	mm
27	EOS-M400	EOS-M400	Building height	400	mm
28	EOS-M400	EOS-M400	Price	€ 1.250.000	€
29	EOS-M400	EOS-M400	Gas consumption	7	liters/minute @1bar
30	EOS-M400	EOS-M400	Compressed air pressure	7	bar
31	EOS-M400	EOS-M400	Compressed air consumption	333	liter/minute
32	EOS-M400	EOS-M400	Annual maintenance cost	€ 55.000	€/year
33	EOS-M400	EOS-M400	Building area	55	m2
34	EOS-M400	EOS-M400	Recoating time	13	seconds
35	EOS-M400	EOS-M400	Focus Diameter	0,09	mm
36	EOS-M400	EOS-M400	LaserPower	1000	W
37	EOS-M400	EOS-M400	Warm up power	9,32	kW
38	EOS-M400	EOS-M400	Build power	9,73	kW
39	EOS-M400	EOS-M400	Cool down power	1,33	kW
40	EOS-M400	EOS-M400	Number of Laser	1	-
41	EOS-M400	EOS-M400	Contemporaneity factor	100%	%
42	EOS-M400	EOS-M400	WarmupTime	60	minutes
43	EOS-M400	EOS-M400	CoolDownTime	90	minutes
44	EOS-M400	EOS-M400	SetupTime	180	minutes
45	EOS-M400	EOS-M400	BuildPlateLoadTime	60	minutes
46	EOS-M400	EOS-M400	BuildPlateUnloadPowderRemovalTime	90	minutes
47					

Figura 17: Caratteristiche macchina M290 ed M400

	A	B	C	D	E
50	EOS-M400-4Plate width	EOS-M400-4	Plate width	400	mm
51	EOS-M400-4Plate length	EOS-M400-4	Plate length	400	mm
52	EOS-M400-4Building height	EOS-M400-4	Building height	400	mm
53	EOS-M400-4Price	EOS-M400-4	Price	€ 1.450.000	€
54	EOS-M400-4Gas consumption	EOS-M400-4	Gas consumption	7	liters/minute @1bar
55	EOS-M400-4Compressed air pressure	EOS-M400-4	Compressed air pressure	7	bar
56	EOS-M400-4Compressed air consumption	EOS-M400-4	Compressed air consumption	333	liter/minute
57	EOS-M400-4Annual maintenance cost	EOS-M400-4	Annual maintenance cost	€ 64.000	€/year
58	EOS-M400-4Building area	EOS-M400-4	Building area	55	m2
59	EOS-M400-4Recoating time	EOS-M400-4	Recoating time	13	seconds
60	EOS-M400-4Focus Diameter	EOS-M400-4	Focus Diameter	0,1	mm
61	EOS-M400-4LaserPower	EOS-M400-4	LaserPower	400	W
62	EOS-M400-4Warm up power	EOS-M400-4	Warm up power	15,12	kW
63	EOS-M400-4Build power	EOS-M400-4	Build power	15,78	kW
64	EOS-M400-4Cool down power	EOS-M400-4	Cool down power	2,16	kW
65	EOS-M400-4Number of Laser	EOS-M400-4	Number of Laser	4	-
66	EOS-M400-4Contemporaneity factor	EOS-M400-4	Contemporaneity factor	75%	%
67	EOS-M400-4WarmupTime	EOS-M400-4	WarmupTime	60	minutes
68	EOS-M400-4CoolDownTime	EOS-M400-4	CoolDownTime	90	minutes
69	EOS-M400-4SetupTime	EOS-M400-4	SetupTime	180	minutes
70	EOS-M400-4BuildPlateLoadTime	EOS-M400-4	BuildPlateLoadTime	60	minutes
71	EOS-M400-4BuildPlateUnloadPowderRemovalTime	EOS-M400-4	BuildPlateUnloadPowderRemovalTime	90	minutes

Figura 18: Caratteristiche macchina M400-4

In questi screenshot si può osservare l'immissione di tutti i parametri della macchina di stampa nel modello di costo.

Anche in questo caso tutti i valori non subiscono alcuna variazione nel tempo, poichè sono caratteristiche specifiche dei singoli dispositivi.

4.3. COSTO ORARIO MACCHINA

	A	B	C
1	Name	Value	Unit of measure
2	Printer	EOS-M290	
3	Price	€ 480.000	
4	Annual maintenace cost	€ 22.000	€/year
5	Depreciation time	5	years
6	Discount rate	8%	%
7	Building area	€ 27	m2
8	Building yearly rent rate	€ 130	€/m2/year
9	Machine discounted cost	€ 672.000	€
10	Load factor	57%	
11	Working time	4993	h
12	Depreciation hourly rate	€ 26,92	€/h
13	Maintenance hourly rate	€ 4,41	€/h
14	Production overhead hourly rate	€ 0,70	€/h
15	Costo orario macchina	€ 32,03	€/h
16			

Figura 19: Costo orario M290

In questa rappresentazione vengono riportati i dati della stampante usati per calcolarne il costo orario.

Analizzando la tabella si può notare che alcuni sono evidenziati in giallo, altri no: le caselle colorate rappresentano i parametri fissi che non variano con il tempo; al contrario, nelle altre, sono inseriti valori che possono cambiare e quindi comportare una variazione del prezzo.

Si è riportato un unico prospetto perché, nel foglio Excel, sotto la voce “Printer”, è possibile cambiare tipologia di stampante e quindi tutti gli elementi, per calcolare il costo orario.

	A	B	C	D	E	F
	GUID	Name	Category	Unitary Cost	Unit of measure	Commercial reference name
2	EOS-M290	EOS-M290	3D Printer	€ 32,00	€/hour	EOS M290
3	EOS-M400	EOS-M400	3D Printer	€ 84,00	€/hour	EOS M400
4	EOS-M400-4	EOS-M400-4	3D Printer	€ 96,00	€/hour	EOS M400-4
5	Engineer	Engineer	Labour	€ 35,00	€/hour	Ingegnere di processo esperto in Additive Manufacturing
6						
7						
8						
9						
10						
11						

Figura 20: Costi orari nel modello di costo

Nella tabella qui sopra, invece, sono indicati tutti i costi orari, sia quelli relativi ai dispositivi, sia che quelli della manodopera di un ingegnere per le fasi precedenti e successive alla fase di Build.

4.4. RIPARTIZIONE COSTI MACCHINA

	A	B	C
1	Machine	Category	CategoryPercentValue
2	EOS-M290	Manodopera	0%
3	EOS-M290	Ammortamento + Capitale	84%
4	EOS-M290	Materiali di consumo	0%
5	EOS-M290	Amministrazione + Suolo	2%
6	EOS-M290	Manutenzione	14%
7	EOS-M290	Energia	0%

Figura 21: Machine Cost Breakdown

In questo foglio di Excel si descrive la ripartizione dei costi della macchina.

Anche in questo caso si ha un'unica tabella dove, nella colonna "Machine" è possibile scegliere la tipologia di stampante.

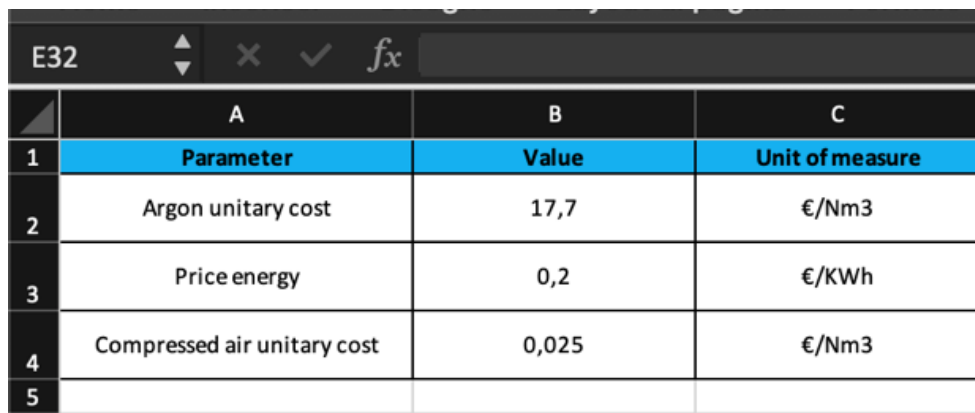
4.5. FATTORE CONTEMPORANEITA'

	A	B	C
1	Numero Laser	Fattore Contemporaneità	Fonte
2	1	100%	Estimation
3	2	90%	Estimation
4	4	75%	Estimation

Figura 22: Fattori di contemporaneità

Nel prospetto superiore viene mostrato come il fattore di contemporaneità vari con il numero di laser.

4.6. COSTI UNITARI



The image shows a screenshot of an Excel spreadsheet with a formula bar at the top displaying 'E32'. The spreadsheet contains a table with three columns: 'Parameter', 'Value', and 'Unit of measure'. The rows are numbered 1 to 5. Row 1 is the header row. Row 2 contains 'Argon unitary cost' with a value of 17,7 and unit €/Nm3. Row 3 contains 'Price energy' with a value of 0,2 and unit €/KWh. Row 4 contains 'Compressed air unitary cost' with a value of 0,025 and unit €/Nm3. Row 5 is empty.

	A	B	C
1	Parameter	Value	Unit of measure
2	Argon unitary cost	17,7	€/Nm3
3	Price energy	0,2	€/KWh
4	Compressed air unitary cost	0,025	€/Nm3
5			

Figura 23: Costi unitari

Qui invece sono stati riportati i prezzi dei consumabili. Questi non sono fissi e variano in base all'offerta di mercato.

4.7. PARAMETRI COMPONENTE

F35			
	A	B	C
1	Component parameters		
2	Size X		mm
3	Size Y		mm
4	Size Z	0	mm
5	Area	0	mm ²
6	Volume	-	mm ³
7	Support Volume		mm ³
8	Relative density of supports	20%	
9	Material	17-4PH	-
10	Weight	0	Kg
11	Density component	0,000007800	Kg/mm ³
12	Density supports	0,00000156	Kg/mm ³
13	Components per build	3	-
14	InvestmentLifeTimeQuantity		-
15	BeamSectionType		-
16	GeneralDimensionalTolerance		-
17	GeneralGeometricTolerance		-
18	GeneralRoughness		μm

Figura 24: Parametri del componente

In questo schema sono stati rappresentati i dati relativi al componente.

Come si può notare, anche in questo caso ci sono celle colorate. Questo perché i parametri del pezzo come l'altezza, il volume e la tipologia di materiale usato non variano nel tempo.

4.8. COSTO BUILD

Per lo sviluppo e il calcolo delle spese, in questo modello, si è proceduto come segue (per maggiore chiarezza si dividerà quest'unico foglio in più parti):



	A	B	C	D
1	Parameter name	Unit of measure	Description	Value
2	Calcolo tempi di processo			
3	Time set up machine	min	Tempo di set up	90
4	Build plate load time	min	Tempo di posizionamento della piastra	30
5	Plate warm up	min	Tempo di riscaldamento della piastra	30
6	Build time	min	Tempo totale di stampa	30
7	Coating time	min	Tempo di recoating della polvere	30
8	Scanning time	min	Tempo di aggregamento della polvere	0
9	Cool down	min	Tempo di raffreddamento	30
10	Powder and plate removal	min	Tempo rimozione piastra e polvere	30
11	Total time	min	Tempo totale di processo	240

Figura 25: Tempi di stampa

Nella prima parte del documento vengono riportati tutti i tempi che sono presenti nella fase di stampa.

La formulazione del Coating Time e dello Scanning Time è già stata studiata e sviluppata precedentemente.

Calcolo tempo di scanning				
13	Layer thickness	µm	Spessore del layer	20
14	Distance between plate and piece	mm	Distanza tra pezzo e faccia superiore piastra	5
15	Number of layers	-	Numero di layer	300
16	Overlap Rate	%	Fattore di ricoprimento tra 2 passate successive. Valore compreso tra 0% e 30%	20%
17	Hatch Distance	mm	Distanza fra 2 passate successive di uno stesso layer	0,08
18	Laser linear energy density	J/mm	Densità energia lineare del laser	0,110
19	Volume of each layer	mm3	Volume medio di ogni layer	0
20	Medium area	mm2	Area media di ogni layer	0
21	Middle path	mm	Percorso medio di ogni layer	4
22	Equivalent area	mm2	Area equivalente cerchio	2
23	Equivalent diameter	mm	Diametro equivalente cerchio	2
24	Number of perimetral passes		Numero di volte da passare per perimetro	2
25	Average path perimeter each layer	mm	Perimetro medio del percorso per ogni strato	10
26	Total path	mm	Percorso totale pezzo	4.258

Figura 26: Calcolo del Total Path

Nel riquadro qui sopra sono riprodotti tutti i parametri che si utilizzano per il calcolo dello Scanning Time. Questi valori si ottengono da formule approfondite nel capitolo 2. Anche in questo caso le celle colorate rappresentano dei valori fissi, che non cambiano né con il tempo né scegliendo un altro componente.

Calcolo materia prima				
28	Material unitary cost	€/kg	Costo unitario materia prima	52,50
29	Waste Material	%	Polvere persa rispetto al peso del pezzo stampato	14%
Calcolo gas inerte				
31	Inert gas unitary consumption	Nm3/hour	Consumo unitario di gas inerte	0,18
32	Argon unitary cost	€/Nm3	Costo unitario gas inerte (Argon)	17,7
33	Inert gas usage time	hours	Tempo impiego gas inerte	11,4
34	Inert gas volume used	Nm3	Volume usato per gas inerte	2,05
35	Inert gas cost	€	Costo gas inerte	36,20
Calcolo aria compressa				
37	Compressed air unitary consumption	Nm3/hour	Consumo unitario aria compressa	17,82
38	Compressed air usage time	hours	Tempo impiego aria compressa	11,4
39	Compressed air consumption	Nm3	Consumo aria compressa	203
40	Compressed air unitary cost	€/Nm3	Costo unitario aria compressa	0,03
41	Compressed air cost	€	Costo aria compressa	5,06
Calcolo energia				
43	Price Energy	€/kWh	Costo unitario energia elettrica	0,20
44	Energy usage time	hours	Tempo impiego energia elettrica	11
45	Energy cost warm up	€	Costo energia di warm up	0,25
46	Energy cost build	€	Costo energia di build	5,45
47	Energy cost cool down	€	Costo energia di cool down	0,04
48	Energy cost total	€	Costo complessivo energia elettrica	5,74

Figura 27: Calcoli per determinazione di materia, aria compressa ed energia

Nella tabella precedente vengono mostrati tutti i dati fondamentali per definire il costo del materiale, del gas inerte, dell'aria compressa e dell'energia.

	Riepilogo Costi			Costo	Percentuale costo	Costo orario processo
50	MaterialCost			€ 0,00	0%	-
51	NetMaterialCost			€ 0,00		
52	WasteMaterialCost			€ 0,00		
53	MachineCost			€ 128,01	55%	€ 32,00
54	MachineSetupCost			€ 48,00		
55	MachineOperationCost			€ 16,01		
56	MachineIdleCost			€ 64,00		
57	LabourCost			€ 98,00	42%	€ 24,50
58	LabourSetupCost			€ 52,50		
59	LabourOperationCost			€ 35,00		
60	LabourIdleCost			€ 10,50		
61	EquipmentCost			€ 0,00	0%	€ 0,00
62	EquipmentInitialCost			€ 0,00		
63	EquipmentMaintenanceCost			€ 0,00		
64	ConsumableCost			€ 5,45	2%	€ 1,36
65	ConsumableSolidCost			€ 0,00		
66	ConsumableLiquidCost			€ 0,00		
67	ConsumableGasCost			€ 5,45		
68	EnergyCost			€ 0,55	0%	€ 0,14
69	EnergyMachineCost			€ 0,55		
70	EnergyLabourCost			€ 0,00		
71	EnergyEquipmentCost			€ 0,00		
72	TOTAL			€ 232,01		€ 58,00
73						

Figura 28: Tabella riepilogativa costi

La sezione del foglio Excel appena inserito è la parte principale dell'intero studio, poichè viene riportato il riepilogo dei costi.

Come si può vedere sono presenti tutte le voci di spesa, con relativa ripartizione, con in fondo il costo totale della stampa.

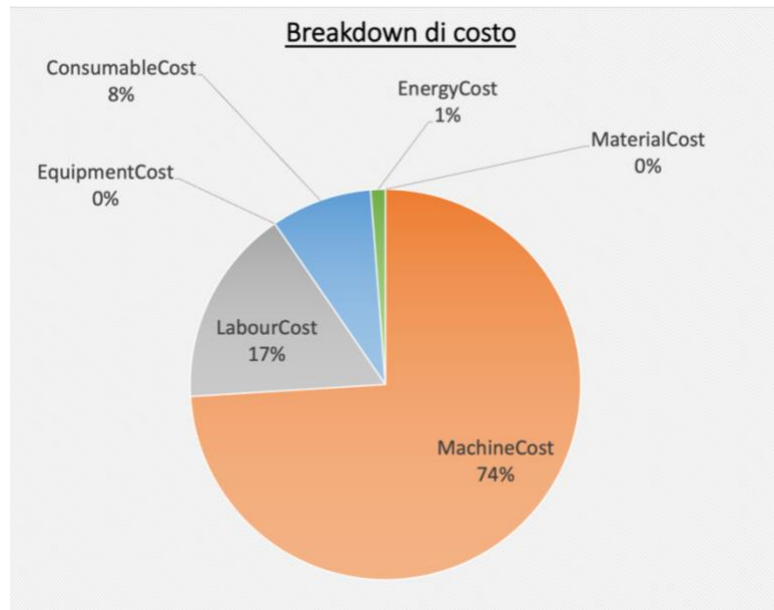


Figura 29: Figura a torta dei costi

L'immagine a torta mostra il prezzo in percentuale di tutte le componenti rispetto al totale. Si può notare che la voce più significativa è quella riguardante la macchina.

75	Machine	EOS-M290	Unità di misura
76	UnitaryCost	€ 32,00	€/hour
77	Plate width	250	mm
78	Plate length	250	mm
79	Building height	325	mm
80	Price	€ 480.000	€
81	Gas consumption	3	liters/minute @1bar
82	Compressed air pressure	6	bar
83	Compressed air consumption	50	liter/minute
84	Annual maintenace cost	€ 22.000	€/year
85	Building area	27	m2
86	Price	€ 480.000	€
87	Recoating time	6	seconds
88	Focus Diameter	0,1	mm
89	Number of Laser	1	-
90	Contemporaneity factor	100%	%
91	WarmupTime	30	minutes
92	CoolDownTime	30	minutes
93	Warm up power	2,52	kW
94	Build power	2,63	kW
95	Cool down power	0,36	kW
96	SetupTime	90	minutes
97	BuildPlateLoadTime	30	minutes
98	BuildPlateUnloadPowderRemovalTi	30	minutes
99	LaserPower	400	W
100			

Figura 30: Parametri macchina

Labour	Engineer	Unità di misura
<u>UnitaryCost</u>	<u>€ 35,00</u>	€/hour
ControlledMachinesQuantity	5	-

Figura 31: Costo orario manodopera

Nella parte finale del foglio sono riprodotte le caratteristiche principali del dispositivo di stampa utilizzato, il costo orario e il numero di ingegneri per il controllo della macchina.

5. Caso studio

In questo capitolo si andrà ad utilizzare il modello di costo sviluppato per un componente; il prezzo che si otterrà verrà analizzato e confrontato con il costo conseguito da un precedente studio.

5.1. PRESENTAZIONE COMPONENTE

Il pezzo preso in considerazione è un blocco cuscinetto.



Figura 32: Blocco cuscinetto
(<https://www.directindustry.it/prod/timken-europe/product-7626-1150319.html>)

Questo strumento funge da alloggio per il cuscinetto, il quale deve interporsi tra organi di macchina posti in rotazione reciproca e può essere opportunamente combinato per vincolare le parti mobili di un meccanismo.

Il blocco può essere un unico pezzo o diviso in due parti, chiuso o aperto.

Nello studio che si condurrà verrà considerata la parte inferiore di un blocco cuscinetto chiuso.

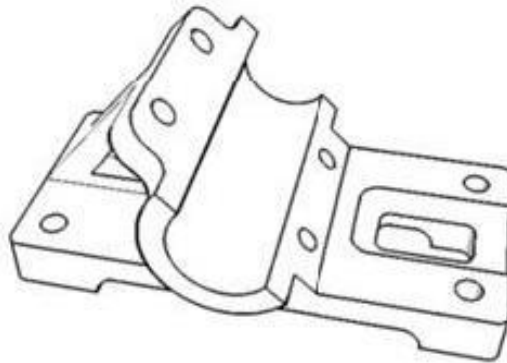


Figura 33: Componente considerato

Le dimensioni e le proprietà di questo pezzo sono:

- Altezza: 52 mm
- Larghezza: 127 mm
- Lunghezza: 76 mm
- Volume: 96645 mm³
- Volume dei supporti: 19341 mm³
- Materiale: 17-4 PH

5.2. SIMULAZIONE COSTO PROCESSO STAMPA

Per prima cosa si vanno ad inserire i parametri relativi al componente nell'apposita tabella:

Q25			
	A	B	C
1	Component parameters		
2	Size X	127	mm
3	Size Y	76	mm
4	Size Z	52	mm
5	Area	0	mm ²
6	Volume	96.645	mm ³
7	Support Volume	19.341	mm ³
8	Relative density of supports	20%	
9	Material	17-4PH	-
10	Weight	0,78400296	Kg
11	Density component	0,000007800	Kg/mm ³
12	Density supports	0,00000156	Kg/mm ³
13	Components per build	3	-
14	InvestmentLifeTimeQuantity		-
15	BeamSectionType		-
16	GeneralDimensionalTolerance		-
17	GeneralGeometricTolerance		-
18	GeneralRoughness		µm

Figura 34: Parametri blocco cuscinetto

Per procedere con il calcolo dei tempi e dei costi di Build, bisogna innanzitutto considerare la macchina di stampa. In questo caso è la EOS M290, avente costo orario di 32€/h.

G20				
1	2	3		
A	B	C	D	
1	Parameter name	Unit of measur	Description	Value
2	Calcolo tempi di processo			
3	Time set up machine	min	Tempo di set up	90
4	Build plate load time	min	Tempo di posizionamento della piastra	30
5	Plate warm up	min	Tempo di riscaldamento della piastra	30
6	Build time	min	Tempo totale di stampa	622
7	Coating time	min	Tempo di recoating della polvere	285
8	Scanning time	min	Tempo di aggregamento della polvere	337
9	Cool down	min	Tempo di raffreddamento	30
10	Powder and plate removal	min	Tempo rimozione piastra e polvere	30
11	Total time	min	Tempo totale di processo	832
12	Calcolo tempo di scanning			
13	Layer thickness	µm	Spessore del layer	20
14	Distance between plate and piece	mm	Distanza tra pezzo e faccia superiore piastra	5
15	Number of layers	-	Numero di layer	2850
16	Overlap Rate	%	Fattore di ricoprimento tra 2 passate successive. Valore compreso tra 0% e 30%	20%
17	Hatch Distance	mm	Distanza fra 2 passate successive di uno stesso layer	0,08
18	Laser linear energy density	J/mm	Densità energia lineare del laser	0,110
19	Volume of each layer	mm3	Volume medio di ogni layer	41
20	Medium area	mm2	Area media di ogni layer	2.035
21	Middle path	mm	Percorso medio di ogni layer	25.436
22	Equivalent area	mm2	Area equivalente cerchio	2.231
23	Equivalent diameter	mm	Diametro equivalente cerchio	53
24	Number of perimetral passes		Numero di volte da passare per perimetro	2
25	Average path perimeter each layer	mm	Perimetro medio del percorso per ogni strato	335
26	Total path	mm	Percorso totale pezzo	73.445.541

Figura 35: Tempi di costruzione

I tempi per stampare il blocco cuscinetto sono riportati in tabella. Si può notare che la voce più dispendiosa è quella relativa alla fase di Build (622 min) che si suddivide in Coating Time (285 min) ed in Scanning Time (337 min).

In particolare per quest'ultimo processo sono state riportare tutte le voci di calcolo.

Per le operazioni Pre-Build, il "Time SetUp Machine" è pari a 90 min, il "Build Plate Load Time" è 30 min come il "Plate WarmUp".

Nel Post-Build, il "Cool Down" ed il "Powder and Plate Removal" durano 30 min ognuno.

Il tempo totale di produzione è di 832 min.

G20						
1	2	3	A	B	C	D
Calcolo materia prima						
27			Material unitary cost	€/kg	Costo unitario materia prima	52,50
29			Waste Material	%	Polvere persa rispetto al peso del pezzo stampato	14%
Calcolo gas inerte						
30			Inert gas unitary consumption	Nm3/hour	Consumo unitario di gas inerte	0,18
32			Argon unitary cost	€/Nm3	Costo unitario gas inerte (Argon)	17,7
33			Inert gas usage time	hours	Tempo impiego gas inerte	11,4
34			Inert gas volume used	Nm3	Volume usato per gas inerte	2,04
35			Inert gas cost	€	Costo gas inerte	36,19
Calcolo aria compressa						
36			Compressed air unitary consumption	Nm3/hour	Consumo unitario aria compressa	17,82
38			Compressed air usage time	hours	Tempo impiego aria compressa	11,4
39			Compressed air consumption	Nm3	Consumo aria compressa	202
40			Compressed air unitary cost	€/Nm3	Costo unitario aria compressa	0,03
41			Compressed air cost	€	Costo aria compressa	5,06
Calcolo energia						
42			Price Energy	€/kWh	Costo unitario energia elettrica	0,20
43			Energy usage time	hours	Tempo impiego energia elettrica	11
44			Energy cost warm up	€	Costo energia di warm up	0,25
45			Energy cost build	€	Costo energia di build	5,45
46			Energy cost cool down	€	Costo energia di cool down	0,04
47			Energy cost total	€	Costo complessivo energia elettrica	5,74

Figura 36: Calcolo consumabili

A seguire, si è proceduto con il calcolo dei consumabili.

Per l'Argon, il tempo impiegato è pari ad 684 min, il volume usato è 2,04 Nm³ ed il costo totale è pari a 36,19€.

L'aria compressa, invece, viene usata per 684 min, viene consumata per 202 Nm³ e ne consegue un costo di 5,06€.

Infine l'energia è consumata per 11 ore e costa 0,25€ per il WarmUp, 5,45€ per la fase di Build e 0,04€ per il Cool Down. Quindi il totale è 5,55€.

	Riepilogo Costi	Costo	Percentuale costo	Costo orario processo
50				
51	MaterialCost	€ 46,92	9%	-
52	NetMaterialCost	€ 41,16		
53	WasteMaterialCost	€ 5,76		
54	MachineCost	€ 368,87	68%	€ 26,61
55	MachineSetupCost	€ 16,00		
56	MachineOperationCost	€ 331,53		
57	MachineIdleCost	€ 21,33		
58	LabourCost	€ 104,02	19%	€ 7,51
59	LabourSetupCost	€ 17,50		
60	LabourOperationCost	€ 11,67		
61	LabourIdleCost	€ 74,86		
62	EquipmentCost	€ 0,00	0%	€ 0,00
63	EquipmentInitialCost	€ 0,00		
64	EquipmentMaintenanceCost	€ 0,00		
65	ConsumableCost	€ 13,75	3%	€ 0,99
66	ConsumableSolidCost	€ 0,00		
67	ConsumableLiquidCost	€ 0,00		
68	ConsumableGasCost	€ 13,75		
69	EnergyCost	€ 5,55	1%	€ 0,40
70	EnergyMachineCost	€ 5,55		
71	EnergyLabourCost	€ 0,00		
72	EnergyEquipmentCost	€ 0,00		
73	TOTAL	€ 539,11		€ 35,51

Figura 37: Costo totale

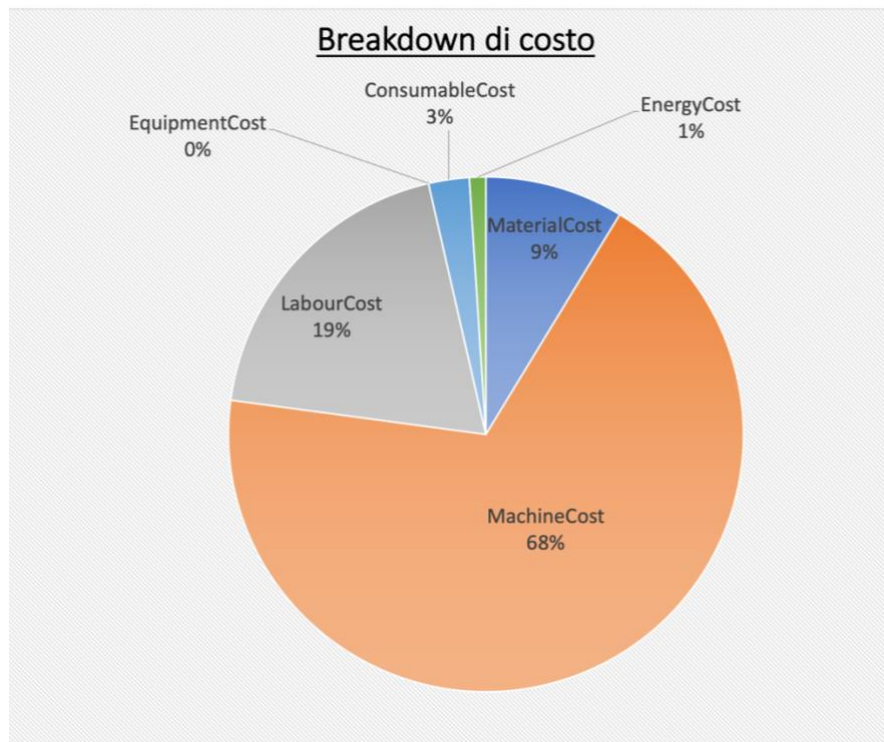


Figura 38: Suddivisione costi

Analizzando la figura 37 si è ricavato:

- **Costo materiale** pari a **46,92€**; di cui 41,16€ è dovuto al materiale netto usato, il restante è il costo del materiale perso.
- **Costo macchina** vale **368,87€**; di questi 16€ è il costo del setup, 331,53€ sono impiegati nel funzionamento durante il Build ed i rimanenti 21,33€ per le fasi pre e post stampa.
- **Costo manodopera** è **104,02€**, ripartiti in: prezzo SetUp di 17,50€, caricamento piastra e rimozione pezzo e piastra da macchina pari a 11,67€ ed infine costo fase WarmUp, Build e CoolDown uguale a 74,86€.
- **Costo consumabili** pari a **13,75€**; le spese per questa voce sono state quantificate in precedenza con l'unica differenza che per ottenere questo prezzo si è diviso il costo totale dell'Argon e dell'aria compressa per il numero di componenti stampati nello stesso processo di Build.
- **Costo energia** vale **5,55€** ed è ottenuta soltanto dalla spesa per l'energia consumata dalla macchina di stampa.
- **Costo attrezzature: 0€.**

Pertanto, il **costo totale** per produrre un blocco cuscinetto è di **539,11€**.

Nell'immagine 38 si è mostrata la suddivisione dei costi all'interno di un grafico. Si può notare che la percentuale di costo maggiore è quella relativa alla macchina, pari al 69% del totale. Il materiale ha un'incidenza del 9%, la manodopera del 19%. Infine l'energia ha un peso dell'1% mentre i consumabili del 3% sul costo totale.


5.3. MODELLI DI COSTO A CONFRONTO

Confrontando il prezzo ed i tempi di stampa ottenuti con quelli ricavati dal modello di costo sviluppato nella tesi "ECONOMIC COMPARISON OF SELECTIVE LASER MELTING AND CONVENTIONAL SUBSTRUCTIVE MANUFACTURING PROCESS" di Zhengdong Liu [17], si riscontra una leggera differenza.

Per comodità, nel confronto tra i due modelli, si inserirà prima il dato ottenuto nella tesi di Liu, poi il valore ottenuto da questo progetto.

Si può notare che la differenza sui tempi di stampa è di circa 60 minuti: nel primo caso è di 738 min, nel modello di costo sviluppato il tempo totale è di 832 min.

Per quel che riguarda il costo di processo, nella tesi di Zhengdong Liu la spesa totale è di 536,96\$ (pari a 453,40€), nel prototipo studiato si è conseguito un costo totale di 539,11€. L'incremento è del 15,9%.



Costs	per piece	per year	percent
Main Machine Cost	\$144.46	\$722,289	26.90%
Auxiliary Cost	\$205.19	\$1,025,930	38.21%
Material Cost	\$160.18	\$800,877	29.83%
Energy Cost	\$7.66	\$38,279	1.43%
Labor Cost	\$19.48	\$97,403	3.63%
Total Cost	\$536.96	\$2,684,778	100.00%
Main Machine Cost			
Machine purchase cost	55,560.72	\$/year	
Machine auxiliary Cost			
Hardware	427.82	\$/year	
Software	427.82	\$/year	
Consumables	1,426.31	\$/year	
Maintenance Cost	28,223.22	\$/year	
Wire erosion machine	14,089.90	\$/year	
Building area cost	34,322.66	\$/year	
Production Overview			
Annual Production Time	5,000.00	hr	
Production volume per line	407.00	parts/year	
Number of Lines Needed	13		
Material Cost			
Total Part Mass	4,764.80	kg	
Total Waste Mass	3,168.59	kg	
Total Material Mass	7,933.40	kg	
Total Material Cost	800,876.57	\$	
Energy Cost			
Specific Energy Consumptio	357.05	MJ/kg	
Total Energy Cost	38,278.78	\$	
Labor Cost			
Labor Cost Rate	30.00	\$/hr	
Total Labor Cost	97,402.50	\$	

Figura 39: Risultati costo della tesi "ECONOMIC COMPARISON OF SELECTIVE LASER MELTING AND CONVENTIONAL SUBABSTRACTIVE MANUFACTURING PROCESS"[17]

Entrando nel dettaglio si può notare che:

- Il prezzo del materiale 17-4 PH è di 160,18\$ (135,26€) nella tesi comparata, mentre di 46,92€ nel nostro modello di costo.

Si riscontra una sostanziale difformità causata dal prezzo per kg, che in circa 3 anni, si è ridotto di 32,74€/kg.

- Il costo macchina (la EOSINT M280) è di 144,46\$ (122€). Equiparando questo risultato con il costo macchina ricavato precedentemente, di 368,87€, si appura una notevole differenza. Questa disuguaglianza è dovuta al fatto che nella tesi di Zhengdong Liu, la spesa complessiva sostenuta per la macchina è stata divisa in 2 voci: MAIN MACHINE COST (questa voce appena descritta) ed AUXILIARY COST, cioè i costi ausiliari della macchina quali hardware, software, consumabili, manutenzione, usura ed area di build, pari a 205,19\$ (173,27€).
- Costo dell'energia vale 7,66\$ (6,5€). Questa voce di spesa non è molto differente da quella del progetto realizzato, cioè di 5,55€.
- Costo manodopera di 19,48\$ (16,5€). La spesa sostenuta è minore rispetto a quella del modello conseguito, dove vale 104,02€.

6. CONCLUSIONI

In questo lavoro si è sviluppato un modello di costo, incentrato sulla fase di Build, che ponesse le basi per giungere ad una previsione di spesa più accurata.

Inizialmente sono stati ricercati ed esaminati una serie di articoli che dessero un'idea delle fasi che caratterizzano la stampa.

Successivamente si è andati ad analizzare tutti i parametri di ogni singolo stadio del processo ed a sviluppare tutte le formule in questione. Inoltre è stato necessario raccogliere una serie di informazioni riguardo la macchina di stampa, i costi orari di manodopera, il costo unitario per i consumabili ed il prezzo dei materiali.

Completate queste, è stato creato un file Excel che potesse semplificare il calcolo e rendere più immediato l'inserimento e verifica dei dati.

Ultimato l'inserimento di tutto ciò, per verificare il corretto funzionamento del modello di costo creato, si sono calcolati tempo e costi per un blocco cuscinetto.

I risultati ottenuti si sono confrontati con quelli calcolati da un precedente studio, vedendo un incremento di prezzo del 15,9%.

Si evince che il processo di Build per il Selective Laser Melting resta tutt'ora molto dispendioso, nonostante i prezzi dei materiali siano scesi di circa il 50% in questi ultimi anni.

In conclusione, in questa tesi si è approfondito l'aspetto di Build per il SLM studiando, analizzando e verificando le fasi, i tempi ed i costi; così facendo si sono poste le basi per completare questo modello nei futuri lavori, andando ad esaminare tutti gli aspetti caratterizzanti il Pre ed il Post Build, così da ottenere un costo complessivo di produzione.

BIBLIOGRAFIA

- [1] M. Mora, «Progettazione di componenti in metallo da realizzare per Additive Manufacturing Design of metal components to be realized for», 2018.
- [2] Luca Manuguerra, «Ottimizzazione strutturale di componenti per la produzione con tecnologie di Additive Manufacturing», 2014.
- [3] K. Pignotti, «Studio di sistemi di additive manufacturing per la realizzazione di manufatti Study», n. February, 2013.
- [4] C. A. Biffi e A. Tuissi, «Produzione additiva Stato dell' arte sulle tecniche di Additive Manufacturing», *La Metall. Ital.*, vol. 1, pagg. 5–10, 2017.
- [5] J. Liu, Q. Chen, X. Liang, e A. C. To, «Manufacturing cost constrained topology optimization for additive manufacturing», *Front. Mech. Eng.*, vol. 14, n. 2, pagg. 213–221, 2019, doi: 10.1007/s11465-019-0536-z.
- [6] R. Kopf, J. Gottwald, A. Jacob, M. Brandt, e G. Lanza, «Cost-oriented planning of equipment for selective laser melting (SLM) in production lines», *CIRP Ann.*, vol. 67, n. 1, pagg. 471–474, 2018, doi: 10.1016/j.cirp.2018.04.032.
- [7] M. Fera, F. Fruggiero, G. Costabile, A. Lambiase, e D. T. Pham, «A new mixed production cost allocation model for additive manufacturing (MiProCAMAM)», *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 92, n. 9–12, pagg.

- 4275–4291, 2017, doi: 10.1007/s00170-017-0492-x.
- [8] David Rosen e Sungshik Yim, «BUILD TIME AND COST MODELS FOR ADDITIVE MANUFACTURING PROCESS SELECTION», pagg. 1–8, 2016.
- [9] Aditya Mahadik, «Cost Estimation of Layer Additive Manufacturing using Break-down Approach», □□□□□□, 2018.
- [10] Roffredo Stefano, «Modello di analisi costi per il processo di Selective Laser Melting», 2019.
- [11] M. Barclift, S. Joshi, T. Simpson, e C. Dickman, «Cost modeling and depreciation for reused powder feedstocks in powder bed fusion additive manufacturing», *Solid Free. Fabr. 2016 Proc. 27th Annu. Int. Solid Free. Fabr. Symp. - An Addit. Manuf. Conf. SFF 2016*, n. Lm, pagg. 2007–2028, 2016.
- [12] B. M. Colosimo, S. Cavalli, e M. Grasso, «A cost model for the economic evaluation of in-situ monitoring tools in metal additive manufacturing», *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 223, n. October 2019, pag. 107532, 2020, doi: 10.1016/j.ijpe.2019.107532.
- [13] B. Previtali, A. G. Demir, M. Bucconi, A. Crosato, e M. Penasa, «Comparative costs of additive manufacturing vs. machining: The case study of the production of forming dies for tube bending», *Solid Free. Fabr. 2017 Proc. 28th Annu. Int. Solid Free. Fabr. Symp. - An Addit.*

Manuf. Conf. SFF 2017, pagg. 2816–2834, 2020.

- [14] A. Mahadik e D. Masel, «Implementation of Additive Manufacturing Cost Estimation Tool (AMCET) Using Break-down Approach», *Procedia Manuf.*, vol. 17, pagg. 70–77, 2018, doi: 10.1016/j.promfg.2018.10.014.
- [15] J. Barsing, «A Cost Breakdown and Production Uncertainty Analysis of Additive Manufacturing», vol. C, n. June, pag. 65, 2018.
- [16] C. Qian, Y. Zhang, Y. Liu, e Z. Wang, «A cloud service platform integrating additive and subtractive manufacturing with high resource efficiency», *J. Clean. Prod.*, vol. 241, pag. 118379, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118379.
- [17] Z. Liu, «ECONOMIC COMPARISON OF SELECTIVE LASER MELTING AND CONVENTIONAL SUBTRACTIVE MANUFACTURING PROCESSES», n. May, pag. 112, 2017.
- [18] G. Costabile, M. Fera, F. Fruggiero, A. Lambiase, e D. Pham, «Cost models of additive manufacturing: A literature review», *Int. J. Ind. Eng. Comput.*, vol. 8, n. 2, pagg. 263–282, 2016, doi: 10.5267/j.ijiec.2016.9.001.
- [19] D. S. Thomas e S. W. Gilbert, «Costs and cost effectiveness of additive manufacturing: A literature review and discussion», *Addit. Manuf. Costs, Cost Eff. Ind. Econ.*, pagg. 1–96, 2015.

- [20] L. Rickenbacher, A. Spierings, e K. Wegener, «An integrated cost-model for selective laser melting (SLM)», *Rapid Prototyp. J.*, vol. 19, n. 3, pagg. 208–214, 2013, doi: 10.1108/13552541311312201.
- [21] J. P. Rudolph e C. Emmelmann, «Self-learning Calculation for Selective Laser Melting», *Procedia CIRP*, vol. 67, pagg. 185–190, 2018, doi: 10.1016/j.procir.2017.12.197.
- [22] S. Saxena, «Cost Modelling of Additive Manufacturing / 3D-Printing», 2018.
- [23] H. Piili, A. Happonen, T. Väistö, V. Venkataramanan, J. Partanen, e A. Salminen, «Cost Estimation of Laser Additive Manufacturing of Stainless Steel», *Phys. Procedia*, vol. 78, n. August, pagg. 388–396, 2015, doi: 10.1016/j.phpro.2015.11.053.
- [24] E. Atzeni e A. Salmi, «Economics of additive manufacturing for end-usable metal parts», *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 62, n. 9–12, pagg. 1147–1155, 2012, doi: 10.1007/s00170-011-3878-1.
- [25] M. Tirougnanassambandamourty e M. SIDORYK, «ADDITIVE MANUFACTURING Cost and Lead Time Estimation, Benefits and Challenges».
- [26] T. Kamps, M. Lutter-Guenther, C. Seidel, T. Gutowski, e G. Reinhart, «Cost- and energy-efficient manufacture of gears by laser beam melting», *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, vol. 21, pagg. 47–60, 2018, doi:

10.1016/j.cirpj.2018.01.002.

- [27] U. A. Manufacturing, I. Metal, e A. Manufacturing, «High-efficiency powder utilisation rate in SLM: dream or reality?», *Insode Met. Addit. Manuf.*, pagg. 6–9, 2015, doi: 10.1061/ciegag.0000116.
- [28] M. Ruffo, C. Tuck, e R. Hague, «Cost estimation for rapid manufacturing - Laser sintering production for low to medium volumes», *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, vol. 220, n. 9, pagg. 1417–1427, 2006, doi: 10.1243/09544054JEM517.
- [29] C. Gebbe, M. Lutter-Günther, B. Greiff, J. Glasschröder, e G. Reinhart, «Measurement of the Resource Consumption of a Selective Laser Melting Process», *Appl. Mech. Mater.*, vol. 805, pagg. 205–212, 2015, doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.805.205.
- [30] A. A. Raus, M. S. Wahab, Z. Shayfull, K. Kamarudin, e M. Ibrahim, «The Influence of Selective Laser Melting Parameters on Density and Mechanical Properties of AlSi10Mg», *MATEC Web Conf.*, vol. 78, pagg. 1–9, 2016, doi: 10.1051/matecconf/20167801078.
- [31] N. T. Aboulkhair, N. M. Everitt, I. Ashcroft, e C. Tuck, «Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting», *Addit. Manuf.*, vol. 1, pagg. 77–86, 2014, doi: 10.1016/j.addma.2014.08.001.
- [32] J. Kang, «Effect of laser power and scanning speed on the microstructure and mechanical properties of SLM fabricated Inconel 718 specimens»,

- Mater. Sci. Eng. Int. J.*, vol. 3, n. 3, pagg. 72–76, 2019, doi: 10.15406/mseij.2019.03.00094.
- [33] Y. Tachibana, T. T. Ikeshoji, K. Nakamura, M. Yonehara, e H. Kyogoku, «Selective laser melting of inconel 718 under high power and high scanning speed conditions», *Mater. Sci. Forum*, vol. 941 MSF, pagg. 1574–1578, 2018, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.941.1574.
- [34] M. Mazur, M. Benoit, M. Easton, e M. Brandt, «Selective laser melting of Inconel 625 alloy with reduced defect formation», *J. Laser Appl.*, vol. 32, n. 2, pag. 022058, 2020, doi: 10.2351/7.0000093.
- [35] C. Cosma, J. Kessler, A. Gebhardt, I. Campbell, e N. Balci, «Improving the mechanical strength of dental applications and lattice structures SLM processed», *Materials (Basel)*., vol. 13, n. 4, 2020, doi: 10.3390/ma13040905.
- [36] D. Wang *et al.*, «The effect of a scanning strategy on the residual stress of 316L steel parts fabricated by selective laser melting (SLM)», *Materials (Basel)*., vol. 11, n. 10, 2018, doi: 10.3390/ma11101821.
- [37] X. Zhang, L. Chen, J. Zhou, e N. Ren, «Simulation and experimental studies on process parameters, microstructure and mechanical properties of selective laser melting of stainless steel 316L», *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.*, vol. 42, n. 8, pagg. 1–14, 2020, doi: 10.1007/s40430-020-02491-3.

- [38] S. Cacace e Q. Semeraro, «About Fluence and Process Parameters on Maraging Steel Processed by Selective Laser Melting: Do They Convey the Same Information?», *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, vol. 19, n. 12, pagg. 1873–1884, 2018, doi: 10.1007/s12541-018-0204-y.
- [39] J. C. Pereira, E. Gil, L. Solaberrieta, M. San Sebastián, Y. Bilbao, e P. P. Rodríguez, «Comparison of AlSi7Mg0.6 alloy obtained by selective laser melting and investment casting processes: Microstructure and mechanical properties in as-built/as-cast and heat-treated conditions», *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 778, n. November 2019, 2020, doi: 10.1016/j.msea.2020.139124.
- [40] H. R. Lashgari, Y. Xue, C. Onggowarsito, C. Kong, e S. Li, «Microstructure, Tribological Properties and Corrosion Behaviour of Additively Manufactured 17-4PH Stainless Steel: Effects of Scanning Pattern, Build Orientation, and Single vs. Double scan», *Mater. Today Commun.*, vol. 25, n. July, pag. 101535, 2020, doi: 10.1016/j.mtcomm.2020.101535.
- [41] J. H. Wang, J. Ren, W. Liu, X. Y. Wu, M. X. Gao, e P. K. Bai, «Effect of selective laser melting process parameters on microstructure and properties of co-cr alloy», *Materials (Basel)*, vol. 11, n. 9, 2018, doi: 10.3390/ma11091546.
- [42] Y. N. Loginov, S. I. Stepanov, N. M. Ryshkov, A. V. Yudin, e E. V.

- Tretyakov, «Effect of SLM parameters on the structure and properties of CP-Ti», *AIP Conf. Proc.*, vol. 2053, n. December, 2018, doi: 10.1063/1.5084490.
- [43] J. Li e Z. Wei, «Process Optimization and Microstructure Characterization of Ti6Al4V Manufactured by Selective Laser Melting», *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 269, n. 1, 2017, doi: 10.1088/1757-899X/269/1/012026.
- [44] M. Król e T. Taski, «Surface quality research for selective laser melting of TI-6AL-4V alloy», *Arch. Metall. Mater.*, vol. 61, n. 3, pagg. 945–950, 2016, doi: 10.1515/amm-2016-0213.
- [45] S. Shrestha, T. Starr, e K. Chou, «Porosity analysis in metal additive manufacturing by micro-CT», *ASME Int. Mech. Eng. Congr. Expo. Proc.*, vol. 2, pagg. 89–95, 2018, doi: 10.1115/IMECE2018-87897.
- [46] P. A. Lykov, E. V. Safonov, e A. M. Akhmedianov, «Selective laser melting of copper», *Mater. Sci. Forum*, vol. 843, n. September, pagg. 284–288, 2016, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.843.284.
- [47] D. Bartels, J. Klaffki, I. Pitz, C. Merklein, F. Kostrewa, e M. Schmidt, «Investigation on the case-hardening behavior of additively manufactured 16MnCr5», *Metals (Basel)*, vol. 10, n. 4, pagg. 1–12, 2020, doi: 10.3390/met10040536.

[48] R. Annuale, «RELAZIONE ANNUALE 2019 STATO DEI SERVIZI e ATTIVITÀ SVOLTA», 2019.