



**UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE**

**FACOLTÀ DI INGEGNERIA**

**Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche**

---

**Corso di Laurea triennale in Ingegneria Meccanica**

***VALUTAZIONE DEI BENEFICI TECNICO-ECONOMICI LEGATI  
ALL'IMPIEGO DI TECNOLOGIE DI FABBRICAZIONE ADDITIVA  
NEL PROCESSO DI MICROFUSIONE***

*EVALUATION OF TECHNICAL-ECONOMICAL BENEFITS RELATED TO  
ADDITIVE MANUFACTURING TECHNOLOGIES APPLIED TO THE  
INVESTMENT CASTING PROCESS*

Relatore:  
Prof. Ing. Michele Germani

Correlatore:  
Dott. Ing. Marco Mandolini

Tesi di Laurea di:  
Nicolò Rocchetti

A.A. 2019/2020



# INDICE

INTRODUZIONE.....	1
<b>1. STATO DELL'ARTE.....</b>	<b>3</b>
1.1. INVESTMENT CASTING.....	3
1.1.1. Fasi del processo.....	5
1.2. ADDITIVE MANUFACTURING.....	8
1.2.1. Campi di applicazione.....	9
1.2.2. Workflow.....	10
1.2.3. Vantaggi AM.....	11
1.2.4. Svantaggi AM.....	12
1.2.5. Materiali.....	13
1.2.6. Principali tecnologie AM.....	14
<b>2. MODELLI DI COSTO.....</b>	<b>24</b>
2.1. MODELLO DI COSTO INVESTMENT CASTING.....	24
2.1.1. Pattern manufacturing.....	26
2.2. MODELLI DI COSTO ADDITIVE MANUFACTURING.....	37
2.2.1. Modello SLA.....	38
2.2.2. Modello MJP.....	52
<b>3. CASO STUDIO.....</b>	<b>59</b>
3.1. CONFRONTO SLA – MJP.....	61
3.2. CONFRONTO SLA – INVESTMENT CASTING.....	62
<b>4. ANALISI DELL'IMPATTO AMBIENTALE.....</b>	<b>64</b>
4.1. METODO LCA.....	64
4.1.1. Fasi della procedura LCA.....	65
4.2. LIFE CYCLE ASSESSMENT – SLA.....	69
4.2.1. Modellazione inventario.....	70
4.2.2. Valutazione dell'impatto ambientale.....	74
4.2.3. Risultati finali e analisi di miglioramento.....	78
<b>CONCLUSIONI.....</b>	<b>79</b>
NOTE.....	80
BIBLIOGRAFIA e SITOGRAFIA.....	81



# INTRODUZIONE

Nella presente trattazione si affronteranno tematiche relative alle tecnologie di Additive Manufacturing, produzione additiva nota anche con il nome di stampa 3D, e di Investment Casting, tradizionale processo di microfusione di precisione a cera persa.

Il lavoro è incentrato sulla valutazione tecnico-economica e ambientale dei due processi sopra citati, condotta vagliando quegli scenari, ormai diffusi in ambito industriale, che prevedono l'applicazione in maniera congiunta di diverse tecnologie di fabbricazione al fine di ottimizzare tempi, costi e qualità della produzione.

Il tradizionale processo di Investment Casting è fortemente penalizzato dall'alto costo della fase di tooling e dai lunghi tempi per la fabbricazione dei modelli in cera. Negli ultimi anni, nelle fonderie sta prendendo sempre più piede l'idea del *rapid investment casting* che prevede la realizzazione rapida e diretta dei modelli in cera senza alcun tipo di attrezzatura di tooling.

A partire dall'Investment Casting, considerato globalmente in tutte le sue fasi tradizionali, si è valutata la possibilità di applicare le tecnologie di fabbricazione additiva nella prima fase del processo, ovvero per la produzione dei modelli in cera che, assemblati in grappoli, vengono poi impiegati nei successivi step relativi alla realizzazione della forma in terra per la colata e successiva solidificazione del metallo fuso. In questo modo si evita la produzione di tali modelli mediante stampaggio ad iniezione, che prevede la fase decisamente onerosa di costruzione dello stampo ('tooling'), come avviene tradizionalmente nel processo di microfusione.

Il processo di *prototipazione rapida* permette infatti di convertire un modello 3D CAD direttamente in un modello fisico solido, secondo la logica espressa in Fig.1, dove per "Rapid Prototyping

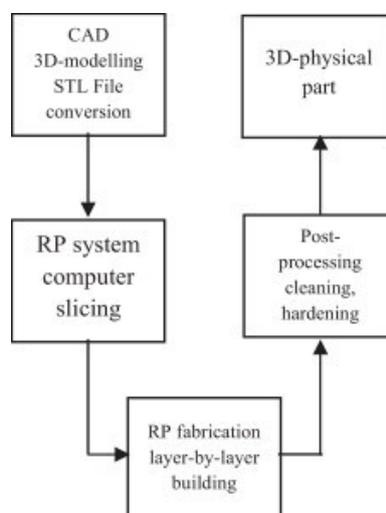


FIGURA 1: PROTOTIPAZIONE RAPIDA

fabrication layer-by-layer building” si intendono le tecnologie alternative di Additive Manufacturing impiegate.

La produzione rapida dei modelli tramite Additive Manufacturing non solo garantisce la possibilità di ridurre i costi (come si vedrà per bassi lotti produttivi), ma permette una maggiore libertà nella progettazione delle forme, geometrie estremamente più complesse di quelle realizzabili mediante stampaggio ad iniezione.

L’obiettivo dell’analisi è quindi quello di ottimizzare la fase di realizzazione dei modelli nel processo di Investment Casting (*indirect tooling* o *rapid prototyping*) ricercando gli eventuali miglioramenti in termini economici e di impatto ambientale apportati dall’impiego delle tecniche di Additive Manufacturing. Le tecnologie additive prese in esame, in quanto adatte alla realizzazione di pezzi in cera, sono la Stereolitografia (SLA) e la MultiJet Printing (MJP).

Dopo un’iniziale trattazione sullo stato dell’arte dei processi di Investment Casting e di Additive Manufacturing, l’elaborato è stato strutturato nei seguenti punti:

1. VALUTAZIONE ECONOMICA dei costi di produzione → implementazione di modelli di costo per l’analisi economica delle due modalità alternative di fabbricazione dei modelli in cera (Additive Manufacturing e stampaggio ad iniezione)
2. APPLICAZIONE AL CASO STUDIO e CONFRONTO in termini di convenienza economica dei due processi al punto precedente
3. ANALISI DELL’IMPATTO AMBIENTALE → una volta definita quale sarà la tecnologia più conveniente dal punto di vista economico per la prototipazione rapida dei modelli in cera, si passerà allo sviluppo di una procedura LCA (Life Cycle Assessment) per la valutazione ambientale di tale processo
4. RISULTATI FINALI

L’analisi è stata condotta utilizzando come caso studio un modello di fibbia per cinture, prodotto dall’azienda marchigiana Santoni Srl, che si occupa della realizzazione e della prototipazione rapida di accessori moda nei settori dell’abbigliamento, calzatura, pelletteria e bigiotteria.

Tale elaborato è il risultato dell’esperienza di tirocinio curricolare, condotta presso il dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche dell’Università Politecnica delle Marche, riguardante la ricerca e l’approfondimento degli aspetti sopra citati.

# 1. STATO DELL'ARTE

## 1.1. INVESTMENT CASTING

Il processo di Investment Casting, noto anche con il nome di microfusione o fonderia di precisione a cera persa, è un'arte metallurgica ampiamente diffusa da secoli e una delle più impiegate ai tempi moderni in ambito industriale.

Da sempre permette di realizzare pezzi con un eccellente grado di finitura superficiale, tolleranze dimensionali accurate, forme complesse e geometrie prossime a quelle finali desiderate dei componenti, che non è possibile e troppo dispendioso ottenere con semplici lavorazioni alle macchine utensili.

Inoltre, il progresso tecnologico ha portato l'Investment Casting ad essere tra i processi di fusione dei metalli il più versatile e flessibile, con cui può essere prodotta una vasta gamma di componenti, di qualsiasi tipo di materiale metallico.

Le origini di questa tecnologia risalgono a più di 5000 anni fa, quando cominciarono ad essere realizzati utensili rudimentali utilizzando stampi di argilla e cera d'api per i modelli.

Nel corso dei secoli successivi tale metodo venne sfruttato per la produzione di gioielli (resti furono trovati tra i tesori dei faraoni, nelle tombe delle antiche civiltà dell'America centro-settentrionale, ma anche in Europa, Etruschi, Greci e Bizantini ne facevano uso), statue ed opere d'arte in rame, bronzo e oro (anche durante il periodo romano). Diversi studi a riguardo dimostrano come il processo di microfusione e la sua evoluzione nel corso degli anni abbia rivestito un ruolo fondamentale nello sviluppo della cultura delle antiche civiltà <sup>[1]</sup>.



FIGURA 2: GIOIELLO E STATUETTA REALIZZATI PER MICROFUSIONE

Notevole diffusione del processo si ebbe negli Stati Uniti durante la Seconda Guerra Mondiale, per far fronte alla domanda crescente di componenti bellici estremamente precisi e dalla geometria complessa (per esempio per le turbine degli aerei da guerra).

Oggi l'Investment Casting è un metodo ampiamente usato in una enorme varietà di settori dell'industria, per la produzione di qualsiasi tipo di parte: componenti per automobilismo e aeronautica, testate di cilindri, utensili da cucina, tubazioni, componenti di elettronica, per l'agricoltura, per i settori dell'abbigliamento e della gioielleria.

I getti in acciaio (acciai legati, al carbonio e inossidabili) rappresentano un terzo della produzione totale, ma sono molto diffusi anche getti in rame, titanio e tra i materiali non ferrosi alluminio e leghe di alluminio.



FIGURA 3: COMPONENTI REALIZZATI TRAMITE INVESTMENT CASTING

### 1.1.1. FASI DEL PROCESSO

In Fig.4 vengono sintetizzate le fasi di un processo completo di Investment Casting:

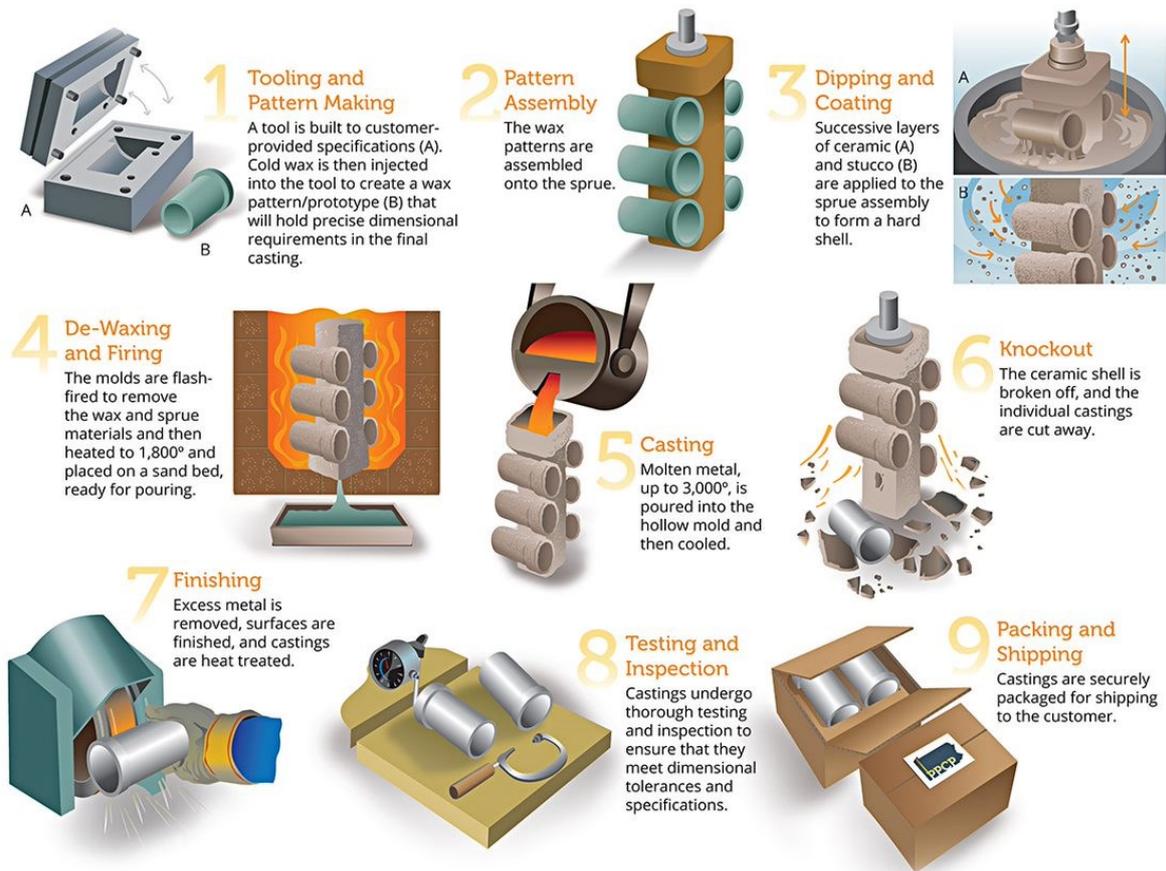


FIGURA 4: PROCESSO COMPLETO DI INVESTMENT CASTING

#### 1) TOOLING AND PATTERN MAKING

Il primo step consiste nella progettazione e produzione dello stampo con cui tramite stampaggio ad iniezione viene realizzato il modello. Prima della produzione del modello, qualora siano presenti delle cavità interne o dei sottosquadri, devono essere previste delle anime, prodotte analogamente ai modelli, ma con cere solubili. Il modello ha la stessa geometria del pezzo finale,



FIGURA 6: STAMPO



FIGURA 5: MATERIALI DIVERSI PER ANIME E MODELLI

ma con dimensioni maggiorate per garantire il doppio ritiro della cera prima e del metallo poi, durante il processo di solidificazione.

Qualora i modelli siano costituiti da più componenti, alla fase di produzione segue la fase di assemblaggio.

## 2) PATTERN ASSEMBLY

A partire da una struttura base (sprue), i modelli in cera vengono assemblati manualmente a formare un grappolo (cluster); i modelli vengono riscaldati, ad esempio tramite dei phon, per sciogliere gli attacchi di colata quanto basta per farli aderire prima al pezzo e poi al cluster. Qualora siano presenti delle anime, lo step successivo consiste nello scioglimento delle stesse immergendo il grappolo in una soluzione in grado di reagire con la cera dell'anima, ma non con quella del modello in modo da mantenerlo inalterato. Segue poi un'operazione di pulizia del grappolo da eventuali bave o imperfezioni.

## 3) DIPPING AND COATING

Fase di realizzazione della forma, ottenuta per:

- IMMERSIONE → il grappolo viene pre-rivestito mediante immersione in una sospensione refrattaria costituita da silice molto fine e legante, acqua, silicato di etile e amido. Viene poi cosparso di sabbia refrattaria e inserito in un contenitore (staffa) riempito con un'ulteriore miscela refrattaria. Tale contenitore viene poi messo in vibrazione mediante un agitatore meccanico per costipare adeguatamente la miscela attorno al modello ed ottenere un'opportuna consistenza della forma.<sup>[2]</sup>
- GUSCIO CERAMICO → viene creato attorno al grappolo un guscio pastoso mediante immersione del grappolo in una miscela semiliquida di refrattario analoga alla precedente; lo strato pastoso aderente al grappolo viene inspessito con tre o quattro applicazioni di refrattario fino ad ottenere un guscio con spessore sufficiente per resistere alla pressione metallostatica del fuso che vi viene colato. Non richiede l'utilizzo di contenitori metallici.<sup>[2]</sup>

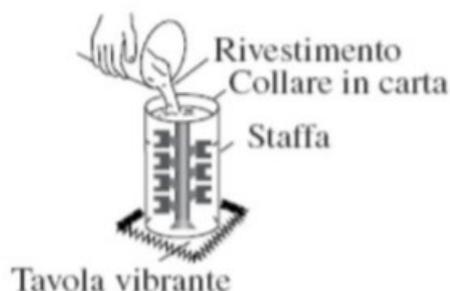


FIGURA 7: IMMERSIONE E RIVESTIMENTO DEL GRAPPOLO NELLA STAFFA; CREAZIONE GUSCIO CERAMICO

#### 4) DE-WAXING AND FIRING

Il guscio ceramico ottenuto viene posto in un forno dove viene rapidamente scaldato in modo da far sciogliere e fuoriuscire la cera del modello all'interno del guscio; generalmente tale cera viene poi trattata per rimuovere le impurità derivanti dal processo precedente, recuperata e riusata per produrre nuovi patterns. È da tale pratica che deriva il nome di processo di microfusione a cera persa.

Il guscio ceramico, privo del modello, viene poi portato ad una temperatura tra i 400 e gli 800°C per rimuovere i residui di cera e per preriscaldare la forma in vista della colata.

#### 5) CASTING

Colata e successiva solidificazione e raffreddamento del metallo fuso all'interno della cavità della forma, a partire da temperature tra 1500 e 1650°C.

#### 6) KNOCKOUT

Al termine del riscaldamento, il guscio ceramico viene rotto tramite un martello pneumatico o sistemi con vibrazioni meccaniche; il grappolo ottenuto viene pulito tramite un getto di aria compressa per rimuovere i residui ceramici e vengono tagliati gli attacchi di colata, ottenendo così il distacco dei pezzi di metallo dalla parte centrale del cluster.

#### 7) FINISHING

Seguono le operazioni secondarie di finitura dei pezzi: lavorazioni alle macchine utensili per ottenere la forma e il grado di finitura superficiale desiderati, eventuali trattamenti termici di normalizzazione, ricottura e tempra per aumentare le proprietà meccaniche dei pezzi metallici ottenuti.

#### 8) TESTING AND INSPECTION

Operazioni di ispezione sui pezzi prodotti, per verificare che siano rispettate tutte le tolleranze dimensionali e geometriche e i requisiti di produzione.

#### 9) PACKING AND SHIPPING

Imballaggio e spedizione.

## 1.2. ADDITIVE MANUFACTURING

Con il termine di Additive Manufacturing (AM) si intendono tutte quelle tecnologie che permettono di produrre un componente fisico a partire da un modello virtuale 3D, costruendolo mediante stratificazione progressiva di materiale su livelli sovrapposti lungo l'asse z.

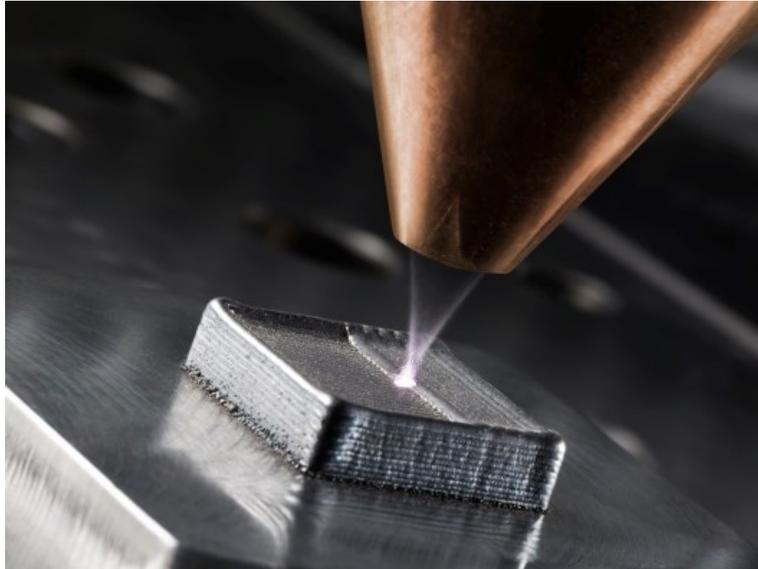


FIGURA 8: ADDITIVE MANUFACTURING

A differenza delle tradizionali tecniche di fabbricazione, basate sull'asportazione di materiale dal grezzo di partenza al fine di ottenere la forma finale desiderata, le tecniche di fabbricazione additiva partono dalla materia prima iniziale e costruiscono il pezzo depositando uno strato di materiale alla volta su ciascuno strato precedentemente depositato.

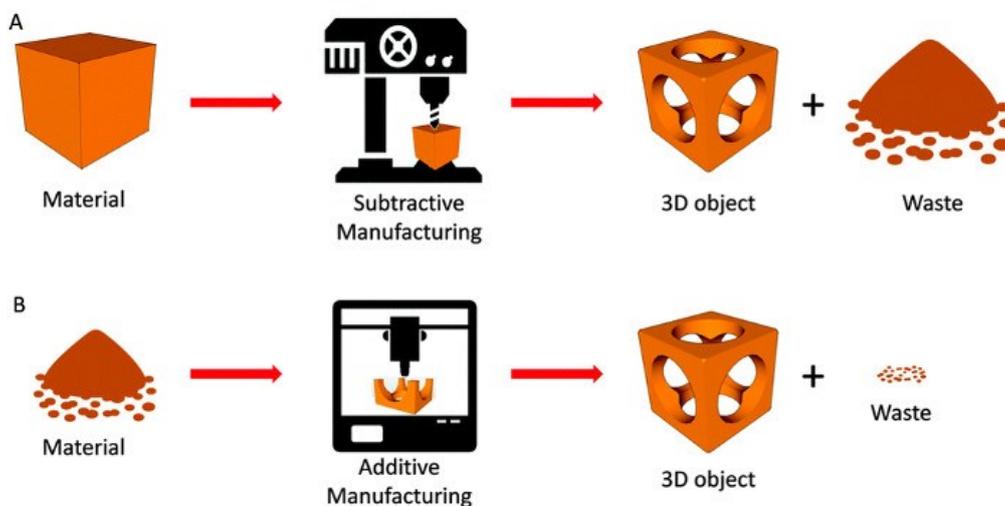


FIGURA 9: TECNICHE DI FABBRICAZIONE SOTTRATTIVA E ADDITIVA

I primi studi relativi ai processi di AM risalgono alla fine del secolo scorso e agli inizi degli anni '00; le prime applicazioni di tipo industriale risalgono agli anni '80, periodo in cui solo pochi gruppi e aziende avevano la possibilità di fare attività di ricerca e sviluppo in AM. L'aumento dei capitali, del numero di aziende e lo sviluppo tecnologico degli anni 2000 hanno contribuito a far crescere in modo più sostenuto le ricerche in campo additivo. Ad oggi, per merito di questo lungo lavoro di ricerca, molte aziende riescono a trarne consistenti benefici nei settori più vari.<sup>[3]</sup>

### 1.2.1. CAMPI DI APPLICAZIONE

Principali destinazioni di utilizzo delle tecniche di AM sono:

- a) **RAPID PROTOTYPING** → tecniche industriali volte alla realizzazione fisica di un prototipo/modello (per esempio rapid investment casting), in tempi relativamente brevi, a partire da una definizione matematica tridimensionale dell'oggetto (CAD). L'obiettivo è ridurre sia i tempi che i costi di costruzione del prototipo stesso.
- b) **RAPID TOOLING** → tecnica che consente, in tempi molto più rapidi, di realizzare attrezzature per la creazione di prototipi come alternativa allo stampo metallico.
- c) **RAPID MANUFACTURING** → produzione rapida di prodotti personalizzati per il cliente; a differenza del rapid prototyping non viene realizzato alcun modello, bensì prodotti finali per l'utilizzo in condizioni reali. Rappresenta la nuova frontiera di utilizzo dell'AM, destinata negli anni a venire ad affiancare sempre di più in modo invasivo e conveniente le tradizionali tecniche di fabbricazione, con tempi di processo sempre minori.

È però importante notare che l'AM non riuscirà mai a sostituire completamente i processi di manifattura tradizionale, ma risulta una tecnologia complementare che, se usata a dovere e per componenti specificatamente progettati, determina un valore aggiunto alla produzione.

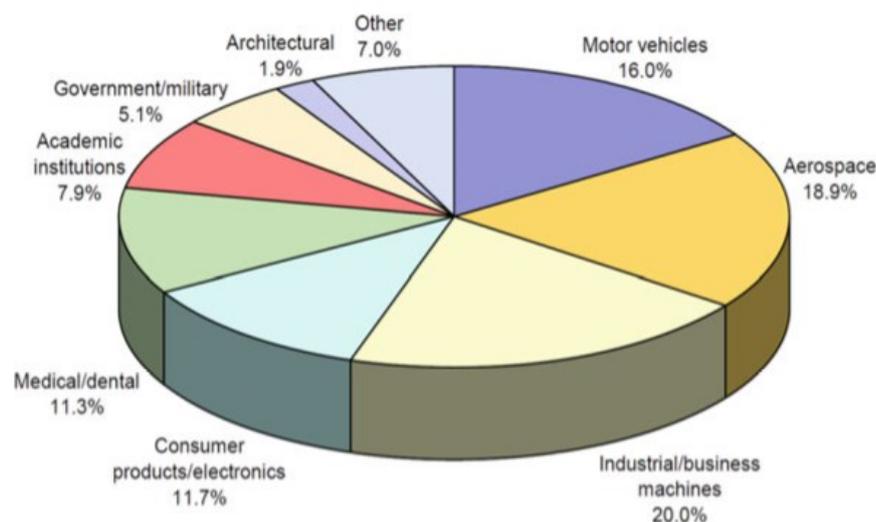


FIGURA 10: CAMPI DI APPLICAZIONE AM, WOHLERS ASSOCIATES

La flessibilità di progettazione e le ottime proprietà del prodotto finale hanno contribuito alla diffusione delle tecnologie di AM in svariati settori: medico (protesi e tutori, fino all'obiettivo di riprodurre gli organi vitali); aerospaziale (palette di rotori per turbine e componenti vari); automotive (componenti in materiale plastico); artistico-culturale (modellini di studio architettonici o vere e proprie opere d'arte).



FIGURA 11: COMPONENTI PRODOTTI TRAMITE TECNICHE AM IMPIEGATI IN DIFFERENTI SETTORI

### 1.2.2. WORKFLOW

Tutti i processi di AM cominciano con la creazione di un modello CAD 3D virtuale, seguito da un processo semi-automatico (svolto ormai da tutti i più diffusi software di progettazione) di conversione del file in formato .stl (Standard Triangle Language), che può essere letto dalla stampante 3D. Maggiore è la risoluzione del file .stl (ovvero della triangolazione in cui il software suddivide il modello), maggiore sarà la qualità della stampa.

Successivamente il file .stl viene letto dal software della macchina AM e il modello viene posto su una piattaforma virtuale (a partire dalla quale sarà poi stampato) e orientato nel modo migliore possibile per ottenere alta qualità delle superfici e resistenza, evitando anisotropie.

Il software della macchina AM suddivide il file .stl in una serie di strati (layers) e consente l'impostazione dei parametri di stampa più importanti, quali risoluzione, spessore dello strato e materiale.

Una volta che il software ha inviato tutte le istruzioni alla macchina, comincia il processo di stampa,

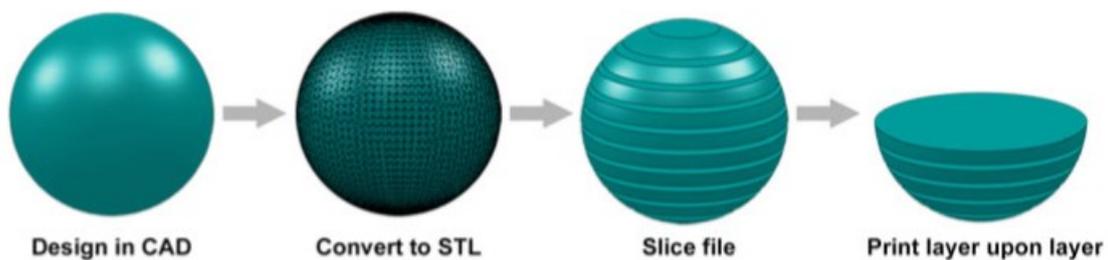


FIGURA 12: WORKFLOW AM

basato sulla stratificazione piano dopo piano (“layer upon layer”). Il meccanismo di realizzazione di ciascuno strato e il tipo di materiale dipendono dalla tecnologia di AM che si sta utilizzando.

Terminate le operazioni di stampa, i prodotti ottenuti vengono sottoposti alle ulteriori lavorazioni necessarie (pulizia di resti di polvere o resina, rimozione materiali di supporto, finiture, trattamenti termici per materiali metallici).

### **1.2.3. VANTAGGI AM**

#### **✓ GEOMETRIE PIÙ COMPLESSE**

Con le tradizionali tecnologie di fabbricazione all’aumentare della complessità della geometria aumentano i costi di produzione fino ad arrivare all’impossibilità di realizzare forme eccessivamente complesse. Nello stampaggio ad iniezione, ad esempio, il pezzo dovrà avere una forma tale da rendere agevole e non troppo complicata la sua estrazione dallo stampo (no sottosquadri) e l’utilizzo eccessivo di anime determinerebbe un forte aumento di tempi e costi di produzione. L’AM permette di realizzare geometrie complesse, sia forme esterne che strutture interne (Fig.13), senza aumenti ulteriori dei costi, anzi forme troppo semplici realizzate con tecniche di AM sarebbero molto più onerose delle stesse geometrie realizzate alle macchine utensili.

Rimane però complicata la realizzazione di volumi cavi, ad esempio di una sfera, data l’impossibilità ad oggi di rimuovere il materiale in eccesso o i supporti dall’interno della sfera.

#### **✓ PEZZI GIÀ ASSEMBLATI**

Si evita la realizzazione di numerosi componenti e non si dovrà tener conto dei giochi necessari per i loro assemblaggi.

#### **✓ MASS CUSTOMIZATION**

L’AM permette una riduzione dei tempi di fabbricazione, ciò implica la minore necessità di stoccaggio di prodotti e la possibilità di realizzare parti quando necessario, su commessa (manufacturing on-demand). Ogni componente può quindi essere fabbricato con caratteristiche diverse, senza aumentarne i costi o i tempi di produzione, a favore di una produzione personalizzata per ogni cliente (apparecchi acustici e dentali, protesi ecc...).

✓ **LIBERTÀ DI PROGETTO**

Le tecniche di AM permettono ai progettisti di essere meno condizionati da quei vincoli progettuali che, se non rispettati, molto spesso compromettono la realizzazione di un componente mediante le tradizionali tecniche di fabbricazione.

✓ **PRODOTTI PIÙ LEGGERI**

Alle tecniche di AM è possibile affiancare un'analisi agli elementi finiti (ottimizzazione topologica) al fine di rimuovere materiale non necessario senza compromettere le proprietà meccaniche del componente. Ciò è molto importante in settori dell'industria come quello aeronautico, in cui ad una maggiore leggerezza corrispondono anche minori consumi di carburante.

✓ **RIDUZIONE DEGLI SCARTI**

✓ **BASSO COSTO DELLA MANODOPERA E MACCHINE PIÙ SICURE**



**FIGURA 13: ESEMPIO DI GEOMETRIA COMPLESSA REALIZZATA TRAMITE TECNICHE AM**

### **1.2.4. SVANTAGGI AM**

- ✗ **ELEVATI COSTI** di materiali in polvere, macchine, servizi ausiliari, licenze software
- ✗ **IMPOSSIBILITÀ DI REALIZZAZIONE DI FORME CAVE**

× OPERAZIONI DI POST-PROCESSING NECESSARIE

× DIFFICILE CONTROLLO QUALITÀ

× QUALITÀ DI STAMPA LIMITATA

### 1.2.5. MATERIALI

Le tecnologie di AM prevedono l'utilizzo di varie tipologie di materiali, di cui due in particolare risultano di grande interesse nel settore dell'ingegneria industriale <sup>[2]</sup>:

1) POLIMERI: resine termoplastiche e termoindurenti che garantiscono costi inferiori sia per l'acquisto del materiale stesso sia in termini di tecnologie di stampa

- PLA (Acido Polilattico) → molto flessibile e adatto a diverse applicazioni, buona stampabilità anche a basse temperatura e buone caratteristiche meccaniche;
- ABS (Acrilonitrile butadiene stirene) → leggero e versatile, ottime proprietà meccaniche;
- NYLON → ha il vantaggio di saldarsi bene su se stesso, rendendo meno visibili i layer;
- HDPE (Polietilene ad alta intensità) → materiale atossico usato nei settori chimico, alimentare ed elettrico;
- PVA (Alcol polivinilico) → utilizzato come materiale di supporto solubile;
- Acrilici, Acrilati, materiali Epossidici

2) METALLI: prestazioni di livello più elevato in termini di proprietà meccaniche, ma richiedono tecnologie più costose e complesse

- ALLUMINIO → impiegato nei settori dell'automotive e dell'aeronautica;
- COBALTO-CROMO → applicazioni ingegneristiche ad alta temperatura, come motori per gli aerei e ambito biomedico;
- NICHEL → utilizzato nel settore aerospaziale ed energetico ad esempio per le turbine;
- ACCIAIO → lega con rapporto costo/prestazioni ottimo, con notevole flessibilità applicativa;
- TITANIO → ideale per applicazioni biomediche ma anche in ambito motorsport e aerospaziale.

## 1.2.6. PRINCIPALI TECNOLOGIE DI AM

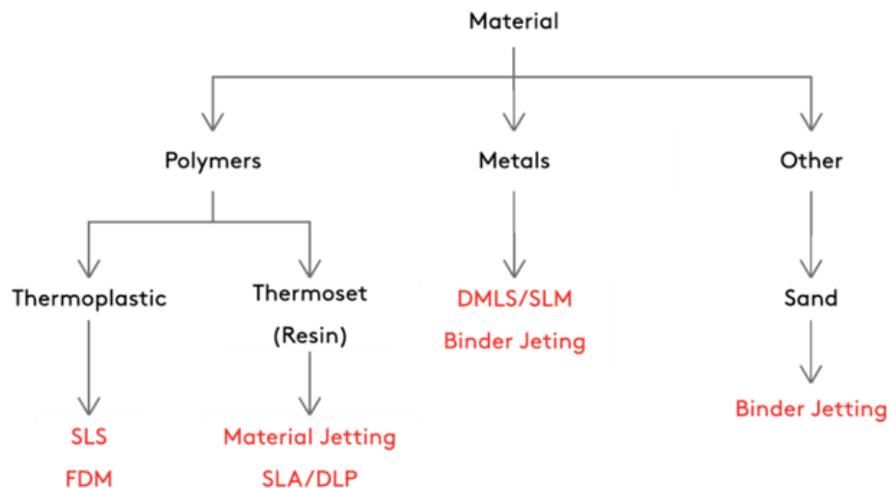


FIGURA 14: CLASSIFICAZIONE TECNOLOGIE AM

Le tecnologie di fabbricazione additiva possono essere classificate in base al tipo di materiale che viene utilizzato, ma anche in base alle caratteristiche di consistenza della materia prima:

- POLVERI → tecniche basate sulla sinterizzazione o fusione delle polveri o sulla deposizione di un legante chimico su un letto di polvere omogeneo
- SOLIDI → tecniche che prevedono l'incollaggio di fogli o l'estrusione di materiale solido o semi-solido
- LIQUIDI → tecniche di fotopolimerizzazione tramite lampade UV o di stampaggio a getto; il materiale subisce una reazione chimica creando legami tra molecole separate.

I principali processi di AM noti e utilizzati in ambito industriale sono:

- **MATERIAL EXTRUSION**
- **MATERIAL JETTING**
- **BINDER JETTING**
- **SHEET LAMINATION**
- **VAT PHOTOPOLYMERIZATION**
- **POWDER BED FUSION**
- **DIRECT ENERGY DEPOSITION**

## MATERIAL EXTRUSION

La tecnologia di Material Extrusion più diffusa è la Fused Deposition Modelling (FDM); il componente viene realizzato a partire da un materiale termoplastico riscaldato allo stato semi-solido che mediante un estrusore viene depositato, sottoforma di filamenti, sulla piattaforma di stampa a formare il primo strato del componente. Completato il primo livello la piattaforma si sposta verso il basso e l'estrusore deposita il secondo strato di materiale sul primo. È previsto un secondo getto di materiale per la deposizione dei supporti, rimossi una volta completato il componente.

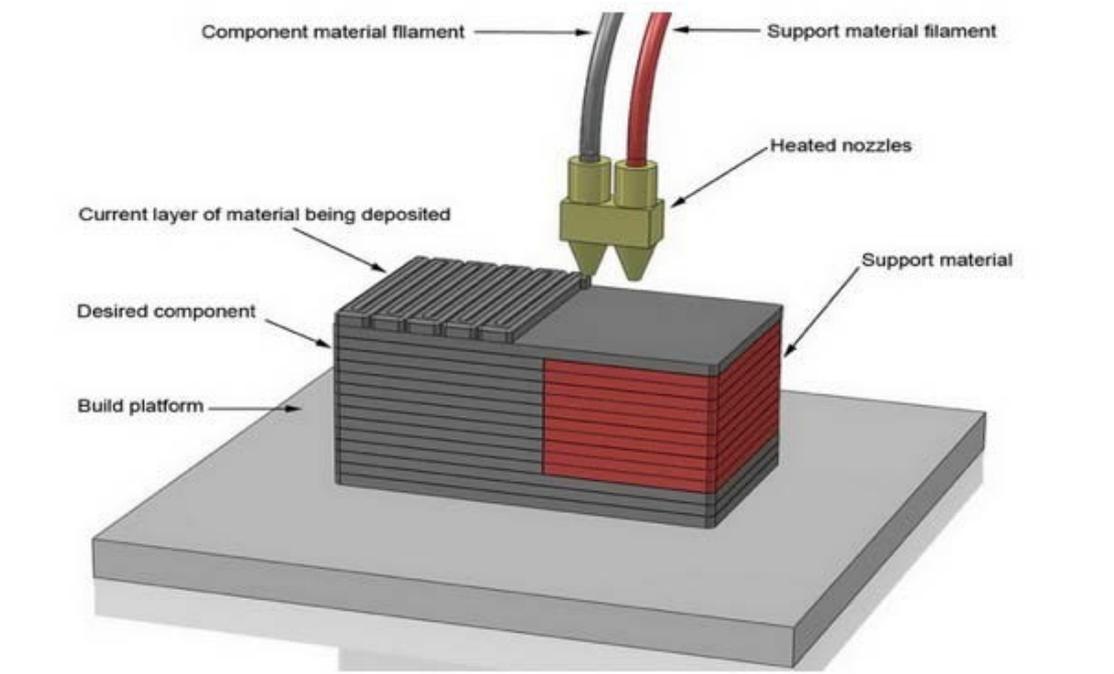


FIGURA 15: MATERIAL EXTRUSION

La tecnica FDM viene impiegata per la stampa di diversi tipi di materiali; polimeri termoplastici come PLA e ABS, materiali speciali (come il polietereimmide, anche indicato con la sigla PEI) per prodotti e attrezzature avanzate per i settori medicale, automobilistico, aerospaziale e alimentare, ma anche polimeri contenenti una percentuale fino all' 80% di polvere metallica.

I limiti di tale processo sono:

- deformazione che il materiale subisce durante il raffreddamento e che determina un comportamento anisotropo, tale che il pezzo risulta avere una resistenza minore in direzione z, piuttosto che nelle direzioni orizzontali x e y;

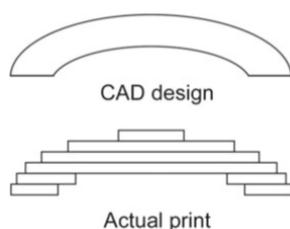


FIGURA 16: STRUTTURA A SCALINI

- finitura superficiale del pezzo finale tra le peggiori ottenibili mediante tecnologie di fabbricazione additiva; si ottiene una struttura a scalini in cui sono distinguibili ad occhio nudo gli strati di materiale depositato durante il processo di stampa.

## MATERIAL JETTING

Le tecnologie di MJ comuni sono:

- Material Jetting Modelling (MJM)
- Photopolymer Jetting (PolyJet) o MultiJet Printing (MJP)

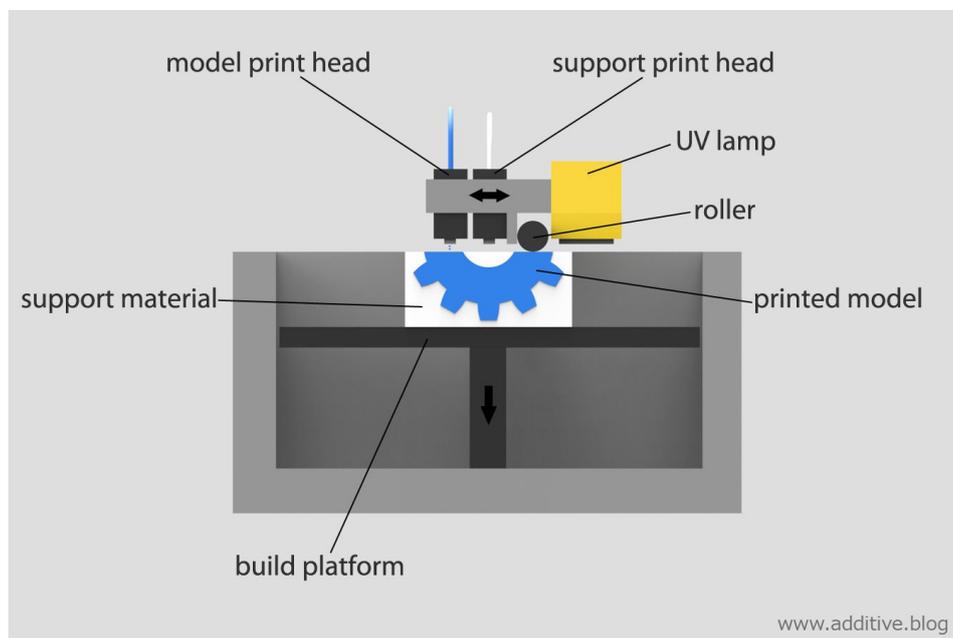


FIGURA 17: MATERIAL JETTING

Il funzionamento si basa sull'utilizzo di una testina di stampa, simile a quella delle stampanti ad inchiostro 2D, che deposita il materiale liquido fotosensibile su ogni livello del componente da produrre. Tale materiale depositato viene consolidato mediante fotopolimerizzazione tramite un fascio di luce UV che lo colpisce. Concluso il primo livello, la piattaforma si abbassa di un'altezza pari allo spessore del layer, per depositare il secondo strato di materiale.

La testina di stampa è progettata per depositare il materiale del pezzo e un secondo materiale solubile per i supporti, che devono poi essere rimossi nella fase di post-produzione (come si vedrà nel capitolo 2, i pezzi prodotti con la MJP vengono immersi in un bagno di alcol isopropilico che funge da solvente).

Le parti prodotte sono generalmente in materiale plastico, molto comuni sono le cere che fanno del MJ una delle tecnologie più utilizzate (insieme alla SLA) per lo sviluppo del rapid prototyping nel processo di Investment Casting.

Le tecniche MJ permettono di produrre componenti molto precisi, con un'alta risoluzione e un ottimo livello estetico.

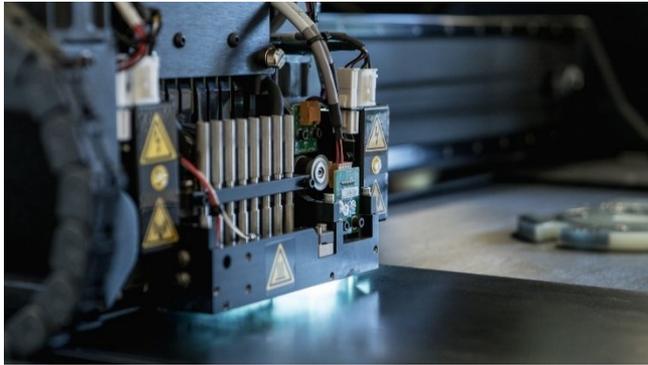


FIGURA 19: FASCIO DI LUCE UV



FIGURA 18: COMPONENTE CON ELEVATA RISOLUZIONE

## BINDER JETTING

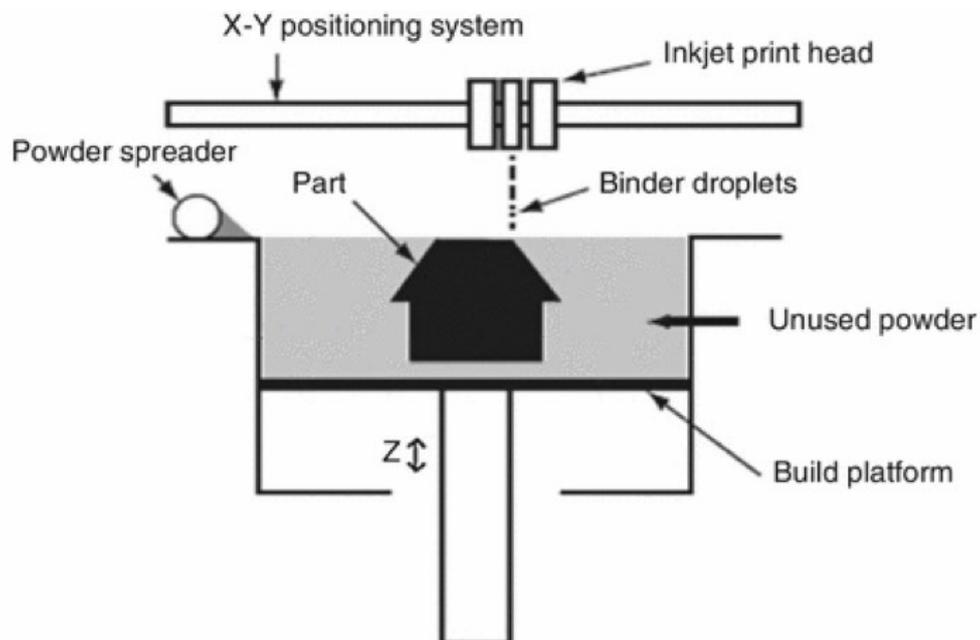


FIGURA 20: BINDER JETTING

A partire da un letto omogeneo di polvere, steso sulla piattaforma di stampa tramite un rullo, la testina di stampa va ad applicare delle gocce di liquido legante nei punti di ciascun livello dove è necessario ottenere il consolidamento della polvere. Successivamente la piattaforma di stampa si abbassa, un altro livello di polvere viene steso sopra il precedente, viene applicato il legante e il processo viene

ripetuto fino al completamento del componente. Dopo la stampa, la parte viene incapsulata nella polvere e lasciata polimerizzare e rinforzarsi.

La polvere non trattata dal legante rimane sospesa sullo strato sottostante e al termine del processo viene rimossa tramite aria pressurizzata (viene poi riutilizzata) scoprendo la parte ottenuta di materiale solidificato.

Le polveri di partenza sono disponibili in una vasta gamma di materiali come acciaio inossidabile, lega di inconel, carburo di tungsteno ecc.



FIGURA 22: COMPONENTE IN LAVORAZIONE SU LETTO DI POLVERE



FIGURA 21: GOCCE DI LEGANTE DEPOSITATE

Vantaggi del BJ sono dati dall'assenza di distorsioni dimensionali connesse a fenomeni di raffreddamento, dal momento che l'incollaggio di materiale avviene a temperatura ambiente, e nei pezzi metallici una rugosità superficiale inferiore ai valori standard degli altri processi di AM. Limiti del processo stanno nell'elevata porosità e fragilità dei componenti ottenuti.

## SHEET LAMINATION

Sono due i processi comuni di Sheet Lamination:

- Laminated Object Manufacturing (LOM)
- Ultrasonic Additive Manufacturing (UAM)

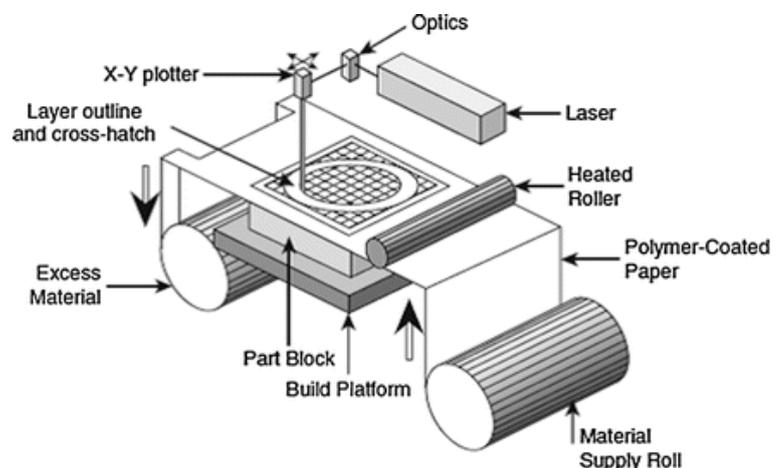


FIGURA 23: SHEET LAMINATION

Nella prima tecnica ogni livello del componente è costituito da un foglio di carta o di materiale polimerico, tali fogli vengono incollati tra loro tramite degli adesivi e poi tagliati con una lama o con un laser nella forma prevista dal modello. I componenti che si ottengono sono di

carta, plastica o talvolta di lamiera e possono essere usati solo a fini estetici, in quanto non possiedono caratteristiche strutturali.

La UAM utilizza fogli di materiale metallico (alluminio, acciaio, rame, fibre di carbonio) che vengono incollati mediante saldature ad ultrasuoni.

Entrambi i processi nella fase di post-produzione richiedono l'estrazione del componente dal materiale del foglio circostante; nella UAM il metallo non può essere rimosso a mano, per cui è necessaria una lavorazione alle macchine utensili del metallo non saldato.

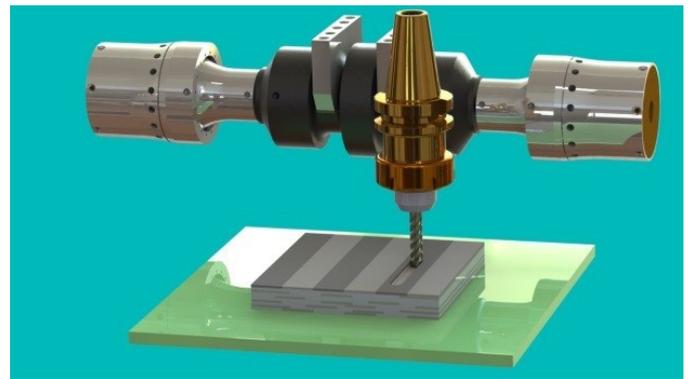
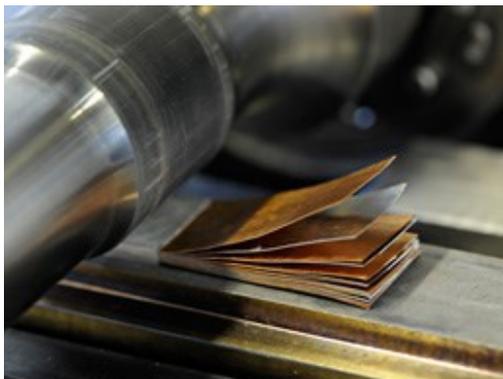


FIGURA 24: SALDATURA AD ULTRASUONI PER L'INCOLLAGGIO DI LAMINE METALLICHE

## VAT PHOTOPOLYMERIZATION

I due processi più diffusi sono:

- Stereolitografia (SLA)
- Digital Light Processing (DLP)

Le tecniche di Vat Photopolymerization costruiscono il componente a partire da resina liquida fotosensibile contenuta in una vasca posta sulla piattaforma di stampa. Il processo consiste nella

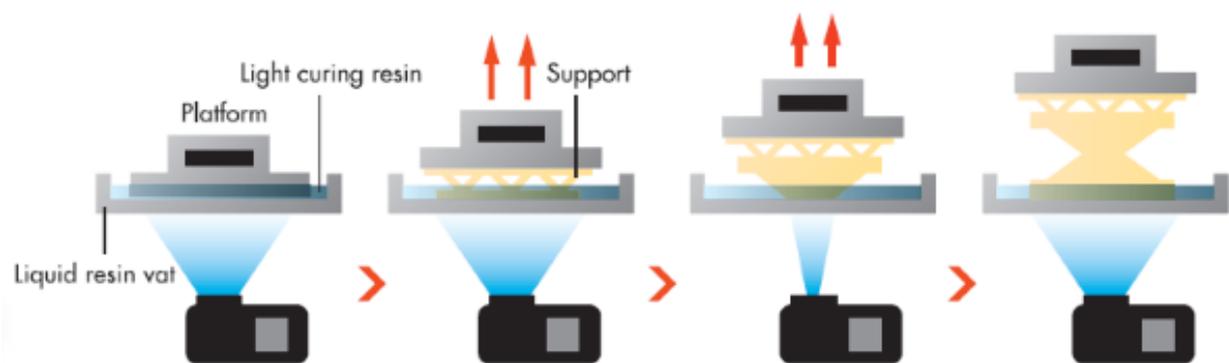


FIGURA 25: PROCESSO DI STREOLITOGRAFIA, TECNICA BOTTOM UP

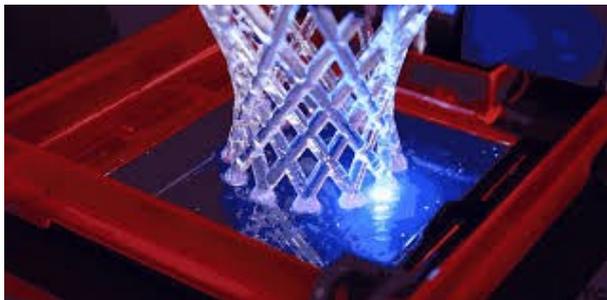
solidificazione a strati della resina liquida, mediante fotopolimerizzazione della stessa. Il fotopolimero viene attivato da un fascio di luce laser UV, o da un DLP con sorgente di luce UV, che direzionato mediante uno specchio in movimento intercetta la resina nei punti in cui essa deve essere consolidata.

Nella tecnica “top down”, al termine di ogni strato la piattaforma si abbassa per permettere la fotopolimerizzazione del livello successivo superiore al precedente; mentre nella tecnica “bottom up” il componente viene realizzato dall’alto verso il basso, con la piattaforma che si alza ad ogni strato completato (tecnica su cui si basa il funzionamento della macchina Form3 di cui si parlerà nel capitolo 3; Fig.25).

La principale differenza tra SLA e DLP sta nel fatto che nella prima tecnica il laser puntiforme fotopolimerizza punto per punto la sezione dell’oggetto, mentre nella seconda il proiettore attiva il fotopolimero su tutta la sezione del layer in modo uniforme.

Con la SLA è possibile ottenere pezzi con un’alta risoluzione e un elevato grado di finitura superficiale. Deve però essere prevista la rimozione manuale dei materiali di supporto e operazioni di post-produzione per la rimozione della resina in eccesso (bagno di alcol isopropilico, vedi cap.2) e per la polimerizzazione post-stampa.

Tra i materiali utilizzati oltre a vari tipi di resina troviamo la cera, che fa della SLA una tecnologia che si presta bene alla produzione rapida dei modelli da impiegare nel processo di Investment Casting.



**FIGURA 26: FOTOPOLIMERIZZAZIONE RESINA LIQUIDA**



**FIGURA 27: ANELLO REALIZZATO PER INVESTMENT CASTING CON MODELLO IN CERA**

## POWDER BED FUSION

Racchiude i processi di:

- Selective Laser Sintering (SLS)
- Selective Laser Melting (SLM)
- Direct Metal Laser Sintering (DMLS)
- Electron Beam Melting (EBM)

Tali processi operano depositando sulla piattaforma di stampa uno strato del componente sottoforma di

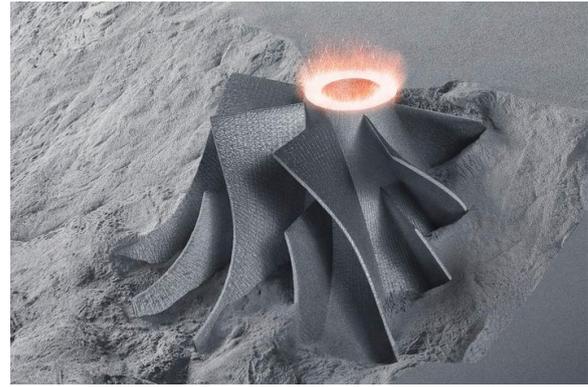


FIGURA 28: FUSIONE E CONSOLIDAMENTO DELLA POLVERE

polvere, riscaldata appena al di sotto della temperatura di fusione, e proiettando su di esso una luce laser (tecniche SL\_) o un fascio elettronico (EBM) che fornisce l'energia termica necessaria per la fusione della polvere. La fusione permette al materiale su ogni strato di consolidarsi lungo tutta la sezione del layer e di legarsi alla polvere dello strato inferiore precedentemente trattata e fusa. La polvere non processata viene recuperata e riutilizzata.

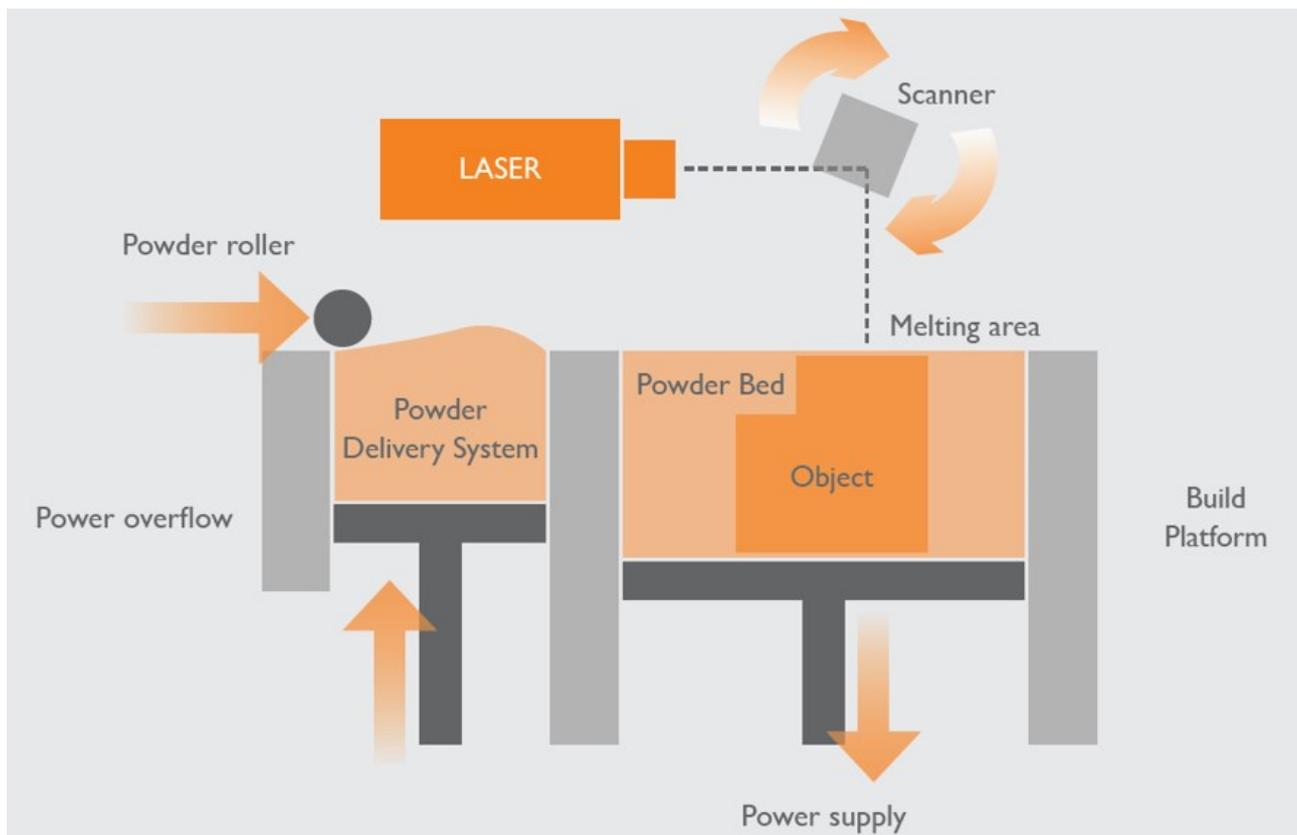


FIGURA 29: POWDER BED FUSION

Le parti stampate possono essere costituite da materiale polimerico (SLS), con proprietà simili a quelle che si ottengono mediante stampaggio ad iniezione, ma con minore risoluzione e struttura a scalini più accentuata, o metallico (SLM, EBM), con un'elevata resistenza meccanica, paragonabile a quella dei pezzi ottenuti con le tradizionali tecniche di fabbricazione, ma nettamente più fragili data l'elevata porosità.

## DIRECT ENERGY DEPOSITION

Una tipica stampante Direct Energy Deposition (DED) è costituita da un braccio multi-assiale che termina con un ugello in grado di erogare simultaneamente sulla superficie della piattaforma di stampa il materiale di costruzione, il laser e un gas di protezione avente il compito di guidare il materiale lungo la traiettoria del laser. Il materiale sottoforma di polvere o di filamenti metallici viene fuso parzialmente tramite l'energia termica fornita dal laser, fonde poi completamente nel bagno di fusione creando un legame metallico tra le particelle della polvere su ciascun layer e la polvere degli strati precedenti.

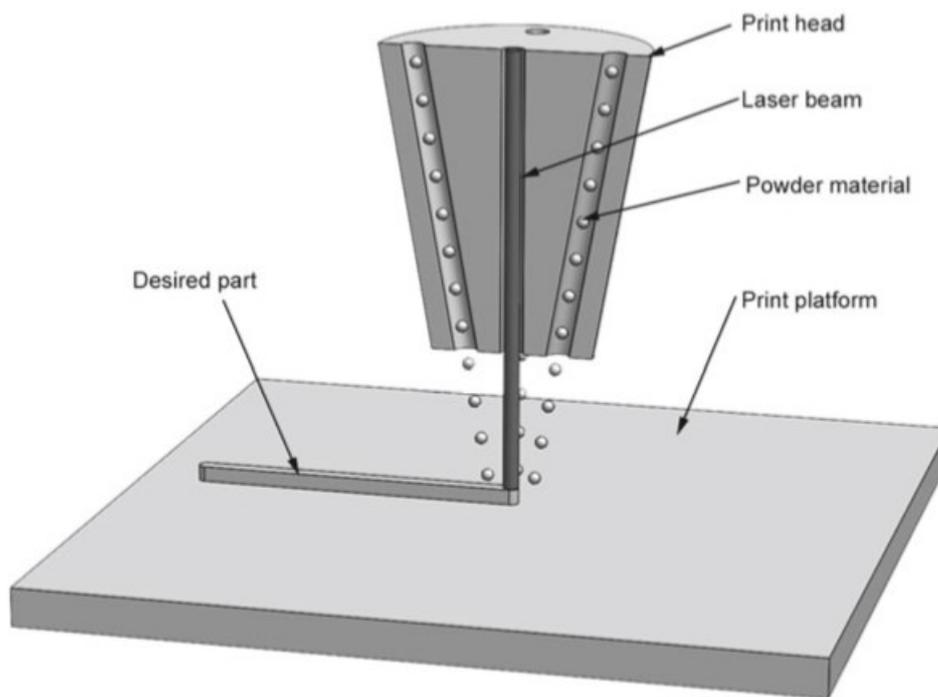


FIGURA 30: DIRECT ENERGY DEPOSITION

Il processo è simile, in linea di principio, a quello delle tecniche di Material Extrusion, ma l'ugello in questo caso può muoversi in più direzioni e non è fissato su un asse specifico; il materiale può infatti essere depositato da qualsiasi angolo poiché le macchine operano lungo 4 o 5 assi.



FIGURA 31: FUSIONE DEI FILAMENTI METALLICI TRAMITE LASER

Tramite la DED si ottengono componenti con bassa accuratezza e un grado di finitura superficiale minore rispetto a quello che si ottiene con qualsiasi altra tecnologia di AM; nella maggior parte dei casi sono infatti richieste lavorazioni di post-produzione alle macchine utensili.

## HYBRID MANUFACTURING

Ultima frontiera dell'innovazione è l'Hybrid Manufacturing, che consiste nel combinare i punti di forza dell'AM con quelli delle tradizionali tecniche di fabbricazione sottrattiva/CNC, al fine di creare un singolo flusso produttivo che utilizzi efficacemente entrambe le tecnologie.

I sistemi ibridi sono spesso costituiti da una macchina utensile (fresa, tornio, braccio robotico ecc...) dotata dell'attrezzatura per la Direct Energy Deposition, in grado di depositare polvere o filo metallico, o per le lavorazioni che sfruttano la fusione a letto di polvere (Powder Bed Fusion) o l'estrusione di materiale polimerico (Material Extrusion)

Esempi di processo combinato possono essere:

- processo additive seguito da lavorazioni sottrattive, ad esempio per realizzare fori o levigare le superfici;
- operazioni di machining seguite da tecniche additive ad esempio per creare una struttura di base su cui poi deve essere realizzato un pezzo complesso.



FIGURA 32: PROCESSO DI AM (DED) SEGUITO DA UNA LAVORAZIONE SOTTRATTIVA

## 2. MODELLI DI COSTO

### 2.1. MODELLO DI COSTO INVESTMENT CASTING

Per la valutazione dei costi relativi alla produzione dei modelli in cera tramite la tecnologia tradizionale di stampaggio ad iniezione, è stato sfruttato un modello di costo già sviluppato nella tesi *“Modello di costo analitico a supporto della progettazione di componenti ottenuti per microfusione”* dall'autore Francesco Morazzini.

Il modello opera secondo questa logica:

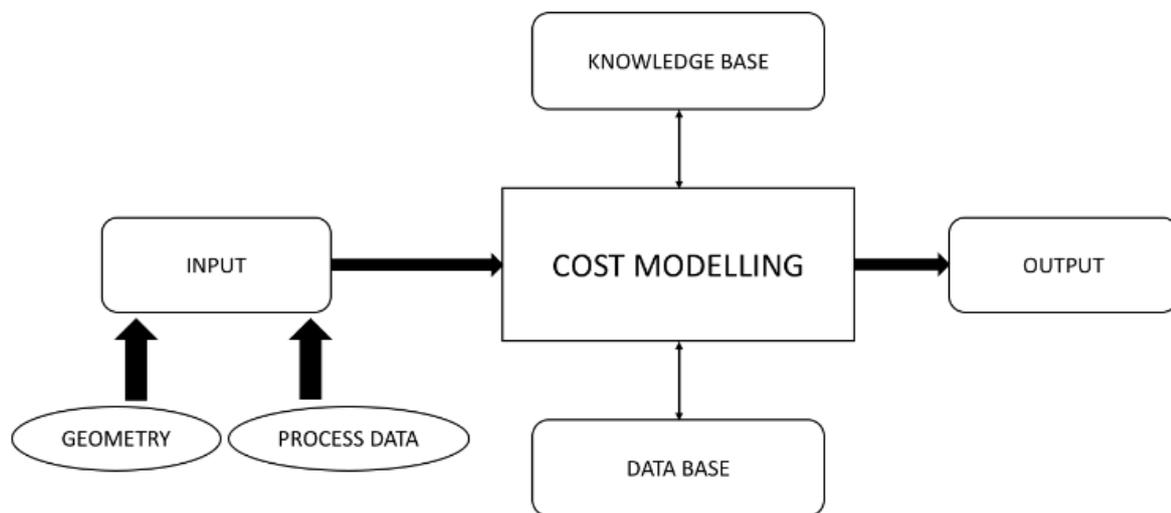


FIGURA 33: LOGICA MODELLO

Geometria del pezzo e informazioni relative al lotto produttivo costituiscono i dati di input del modello; attingendo dal database e dal knowledge base, il modello fornisce come output i dati circa le varie voci di costo considerate (costi di setup, di processo, dei materiali, dell'energia) ripartiti per ogni fase del processo.<sup>[4]</sup>

Nel primo foglio di calcolo (“Riepilogo”, Tab.1) sono riportati il nome e tutti i dati di input del pezzo che il progettista deve inserire: dimensioni, morfologia, numero di facce presenti, materiale di cui è composto il pezzo finale, finitura superficiale e tolleranze imposte, dimensioni e morfologia di eventuali anime da realizzare, informazioni riguardanti il lotto produttivo ed il numero di attacchi per pezzo. Tra questi, i dati considerati e modificati nell'analisi che stiamo trattando (evidenziati in giallo in Tab.1) sono:

- Component length → lunghezza del componente
- Component width → larghezza del componente

- Component volume → volume del componente
- Component number of surface patches → numero di superfici del componente
- Production volume → volume di produzione
- Production batch → lotto di produzione

Tale modello si riferisce al processo globale di Investment Casting, dalla fase di realizzazione delle anime e dei modelli in cera, fino a colata, solidificazione ed estrazione del metallo dalla cavità della forma.

Tale valutazione globale esula però dagli scopi della presente trattazione, infatti ai fini del calcolo dei costi per la produzione dei modelli (“patterns”), si considerano solo le prime 3 fasi di:

- Core manufacturing → fabbricazione dell’anima
- Pattern manufacturing → fabbricazione del modello
- Pattern assembly → assemblaggio del modello

In particolare, il caso studio valutato (vedi cap.3) non prevederà la necessità di anime e di assemblaggio del modello, per cui l’analisi viene limitata alla sola fase di “pattern manufacturing” (evidenziata in arancione in Tab.2).

Component length	lPattern	24	mm
Component width	wPattern	19,4	mm
Component thickness	hPattern	4	mm
Component volume	VPattern	0,000001	m3
Component projected area (projected area of one part in the molding direction)	ApPattern	465,600	mm2
Component section type	SectionPattern	(a) thin-walled	-
Component number of surface patches	NSurfacePatchesPattern	14	-
Component textured surface?	TextureSurfacePattern	no	-
Component material	CastMaterial	Zama	-
Component surface finish	SurfaceFinishPattern	3,2µm	µm
Component tolerance	TolerancePattern	0,25	-
Core length	lCore	0	mm
Core width	wCore	0	mm
Core volume	VCore	0,0000000	m3
Core projected area (projected area of one core in the molding direction)	ApCore	0,000	mm2
Core section type	SectionCore	(a) thin-walled	ad.
Core number of surface patches	NSurfacePatchesCore	0	ad.
Core textured surface?	TextureSurfaceCore	no	ad.
Core quantity (per part)	NCore	0	ad.
Core cavities quantity per mold	N MoldCore	0	ad.
Core thickness	hCore	0	mm
Production volume	ProductionVolume	1000	-
Production batch	BacthSize	1	-
Cast material density	pCastMaterial	6700,00	kg/m3
Part weight/ pattern piece	WeightPart	0,006	kg
Number of gates per part	NGatesPart	1	-
Quantity of parts per cluster	NPartsCluster	661	-
Quantity of cluster per batch	Ncluster	1	-
Investment casting line	InvestmentCastingLine	manual	
Cluster handling	ClusterHandling	manual	

TABELLA 1: RIEPILOGO - DATI DI INPUT

La Tab.2 riporta per ogni fase del processo di Investment Casting (in giallo/arancione sono evidenziate le 3 fasi dette sopra) tempi e costi di setup e di processo, costo del materiale, dei consumabili (es. energia), costo del “tooling” (fabbricazione dello stampo) e costo totale (“total cost”)

dato dalla somma dei costi di setup, processo, materiale e consumabili. I dati estrapolati sono: “Tooling cost” e “Total cost”, da cui si ricava il

$$\text{COSTO AL PEZZO} = \text{“Total cost”} + (\text{“Tooling cost”} \div \text{“Production volume”});$$

(il “Tooling cost” dello stampo si ripartisce su tutti i pezzi del lotto produttivo per i quali viene utilizzato).

Process		Process time	Setup time	Process cost	Setup cost	Material cost	Consumable cost	Tooling cost	Total cost
Core manufacturing	Component	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Pattern manufacturing	Component	0,743	160,000	0,733	157,773	0,000	0,006	1940,780	158,513
Pattern assembly	Component	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Cluster assembly	Cluster	0,005	9,333	0,002	4,667	0,000	0,038	0,000	4,707
Dissolving core	Cluster	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Cleaning and etching	Cluster	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
investing the pattern cluster	Cluster	0,034	0,000	0,018	0,000	0,000	0,022	0,000	0,040
Melt out	Cluster	0,022	0,000	0,011	0,000	0,000	0,000	0,000	0,011
Sintering	Cluster	0,050	0,000	0,039	0,000	0,000	0,000	0,000	0,039
Melting	Cluster	0,030	0,000	0,024	0,000	0,061	0,000	0,000	0,085
Break out	Cluster	0,001	6,667	0,001	3,333	0,000	0,000	0,000	3,334
Blast cleaning	Cluster	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001
Cut off	Cluster	0,064	6,667	0,032	3,333	0,000	0,000	0,000	3,365
<b>Total</b>		<b>0,952</b>	<b>182,667</b>	<b>€ 0,860</b>	<b>€ 169,107</b>	<b>€ 0,061</b>	<b>€ 0,067</b>	<b>€ 1.940,780</b>	<b>€ 170,095</b>
								<b>Costo al pz</b>	<b>160,45 €</b>

TABELLA 2: VOCI DI TEMPI E COSTI RICAVATE

Nel modello sono poi inseriti i fogli di calcolo per ciascuna fase riportata in Tab.2, in cui si esplicitano tutte le caratteristiche e le voci considerate per arrivare al calcolo dei tempi e dei costi sopra citati e riportati in figura. Di seguito viene riportata solo la fase di “Pattern manufacturing”.

### 2.1.1. PATTERN MANUFACTURING

Process name	<b>Pattern manufacturing</b>	
Operation type	Component	
Cost center	Wax injection - 6T 4PILLAR	29 €
Labour	Pattern manufacturing	30,00 €
Labour engagement	100%	
Efficiency	75%	
Yield	100,00%	

TABELLA 3: PATTERN MANUFACTURING

In Tab.3, relativa alla fase di Pattern manufacturing, sono espressi:

- Operation type → se tale fase si riferisce al singolo componente o ad un intero grappolo
- Cost center → costo orario della macchina utilizzata
- Labour → costo orario manodopera
- Labour engagement → percentuale di occupazione di ciascun operatore
- Efficiency → efficienza
- Yield → rendimento

**Parametri considerati nella fase di produzione del modello sono (Tab.13):**

- Number of patterns → tipologie di patterns che vengono prodotte (=1 se il modello realizzato è sempre lo stesso); dato di input da impostare manualmente
- Number of cavities per mold → numero di cavità nello stampo
- Texture surface factor → fattore che indica se il pezzo è testurizzato (fattore=5%) o meno (0%)
- Pattern material type → tipologia di cera utilizzata per il modello. Scelta la cera, si definiscono densità, diffusività termica, temperatura di iniezione, temperatura di espulsione, temperatura dello stampo, pressione di iniezione e costo unitario della cera, dalla seguente tabella:

Pattern Material	Density [kg/m <sup>3</sup> ]	Thermal Diffusivity [mm <sup>2</sup> /s]	Inject Temperature [°C]	Eject Temperature [°C]	Mold Temperature [°C]	Inject Pressure [MN/m <sup>2</sup> ]	Cost [\$/kg]
Polystyrene	1590	0,09	218	77	27	96,5	1,12
Wax 1: liquid	990	0,092	65	50	25	3,4	3,09
Wax 2: liquid	970	0,092	67	50	25	3,4	2,87
Wax 2: paste	970	0,092	60	50	25	3,4	2,87
Wax 2: solid	970	0,092	49	48	25	4	2,87
Wax 3: liquid	1000	0,092	68	50	25	3,4	3,17
Wax 4: liquid	1130	0,092	64	50	25	3,4	2,45
Wax 4: paste	1130	0,092	58	50	25	3,4	2,45
Wax 4: solid	1130	0,092	51	50	25	4	2,45
Wax 5: liquid	1000	0,092	64	50	25	3,4	7,74

TABELLA 4: PATTERN MATERIAL TYPE

- Cast material shrinkage allowance → % di ritiro del metallo fuso, definita dalla Tab.5 una volta scelto il materiale del pezzo finale.

Metal or Alloy	density [kg/m <sup>3</sup> ]	Shrinkage [%]	Energy Required [kWh/kg]	Induction Melting Efficiency [%]	unitary cost [\$/kg]	scrap cost [\$/kg]
Aluminium alloys	2700	3	0,326	60		
Aluminium bronze	7450	6	0,237	60		
Brass (58% copper)	8553	4	0,173	70		
Brass (63% copper)	8553	4	0,177	70		
Brass (73% copper)	8553	4	0,183	70	4,9	0,49
Brass (85% copper)	8553	4	0,17	70		
Brass (90% copper)	8553	4	0,194	70		
Gray cast iron	7150	3	0,39	80		
White cast iron	7700	6	0,405	80		
Tin bronze	8770	5	0,185	70		
Lead	113000	8	0,023	70		
Magnesium	17380	6	0,332	70		
Magnesium alloys (25%)	17380	5	0,332	70		
Manganese bronze	7700	6	0,332	70		
Copper nickel	8930	6	0,341	70		
Nickel	8900	6	0,341	70	47,4	
Phosphor bronze	8800	4	0,185	70		
Carbon steel	7850	5	0,393	80	10	
Chromium steel	7700	6	0,393	80		
Magnesium steel	1740	8	0,393	80		
Stainless steel	7960	6	0,405	80	2,5	0,25
Tin	7310	6	0,037	70		
42CrMo4	7800	5	0,393	80	1,00	0,10
Zama	6700	6	0,237	70	1,20	0,12
Zinc	7140	8	0,093	70		

TABELLA 5: METALS

- Proportion of the runner volume (pattern):

$$\text{Percentuale del volume del colatoio} = 145,63 \times \text{volume del modello} \times 1000000^{-0,485}$$

- Pattern volume with runners → volume complessivo di attacchi di colata, canale di colata e volume del modello:

*Volume del modello con canali di colata = Volume del modello × (1+Percentuale del volume del colatoio/100)*

- Pattern volume with shrinkage and runners → volume del modello comprensivo di canale e attacchi di colata, che tiene conto del ritiro del materiale:

*Volume del modello con canali di colata e ritiro = Volume del modello con canali di colata × (1+percentuale di ritiro del metallo fuso/100)*

- Pattern material cost:

*Costo materiale del modello = densità del materiale del modello × volume del modello × (1+Percentuale del volume del colatoio/100) × (1+percentuale di ritiro del metallo fuso/100) × costo unitario della cera*

- Required shot size:

*Volume degli attacchi di colata = 1,0432 × volume del modello + 10,034/1000000*

- Projected shot area → area ottenuta dalla proiezione degli attacchi di colata:

*Area proiezione attacchi di colata = numero di cavità di modelli per stampo × area di proiezione del modello/100 × (1+Percentuale del volume del colatoio/100)*

- Maximum separating force:

*Massima forza di separazione = (area proiezione attacchi di colata/1000000) × pressione di iniezione × 1000*

Si ricavano poi la forza di bloccaggio della macchina, che deve essere maggiore della massima forza di separazione, la velocità di apertura e di chiusura della macchina e la portata dell'iniezione della cera, fornite dalla Tab.6.

ClampingMachineCore-FSeparatingCore	Code	Clamping Force [kN]	Opening Speed [mm/s]	Closing Speed [mm/s]	Maximum Flow Rate [mm3/s]	cost [\$/h]
	107 Wax injection - WIM01	107	25,4	25,4	82000	30
	311 Wax injection - WIM02	311	25,4	25,4	82000	31
	445 Wax injection - WIM03	445	25,4	25,4	82000	33
	890 Wax injection - WIM04	890	38,1	38,1	82000	38
	1334 Wax injection - WIM05	1334	25,4	25,4	82000	47
	2670 Wax injection - WIM06	2670	25,4	25,4	82000	58
	150 Wax injection - CTM-WI15	150	76,2	76,2	245000	30
	250 Wax injection - CTM-WI25	250	76,2	76,2	245000	31
	500 Wax injection - CTM-WI50	500	76,2	76,2	245000	34
	1000 Wax injection - CTM-WI100	1000	76,2	76,2	425000	40
	150 Wax injection - CTM-WI-CF15	150	38	38	245000	30
	250 Wax injection - CTM-WI-CF25	250	38	38	245000	31
	500 Wax injection - CTM-WI-CF50	500	38	38	245000	34
	200 Wax injection - 20T C-FRAME	200	40	50	350000	31
	350 Wax injection - 35T C-FRAME	350	40	50	350000	33
	500 Wax injection - 50T C-FRAME	500	40	50	350000	34
	750 Wax injection - 75T C-FRAME	750	40	30	500000	37
	60 Wax injection - 6T 4PILLAR	60	40	50	350000	29
	120 Wax injection - 12T 4PILLAR	120	40	50	350000	30
	350 Wax injection - 35T 4PILLAR	350	40	50	350000	33
	500 Wax injection - 50T 4PILLAR	500	40	30	500000	34
	1100 Wax injection - EVOL 2020 110T 4P	1100	30	30	500000	41
	1600 Wax injection - EVOL 2020 160T 4P	1600	30	30	500000	47

TABELLA 6: WAX INJECTION MACHINE TYPE

- Cooling time;

$$\text{Tempo di raffreddamento} = \{3 + [\text{altezza modello}^2 / (\pi \times \text{diffusività termica del materiale})] \times \ln[(3,14 \times (\text{temperatura di espulsione} - \text{temperatura dello stampo}) / (4 \times (\text{temperatura di iniezione} - \text{temperatura dello stampo}))]\} \times \text{fattore dello spessore}$$

dove il fattore dello spessore deriva dalla Tab.7.

MaxThickness	CoolingFactor
0	1
3	1
4	1
6	1
6,5	1
8	0,95
10	0,91
15	0,85
18	0,83
20	0,8
40	0,75
80	0,71
999999	0,5

TABELLA 7: FATTORE DELLO SPESSORE

- Dati da inserire manualmente:

sistema di espulsione utilizzato (semiautomatico o manuale), numero di elevatori e numero di svitatori.

- Clearance factor → fattore di sicurezza

- Hand clearance → spazio per le mani

- Open and close time → tempo di apertura e chiusura della macchina:

- o Sistema di espulsione semiautomatico:

$$= \text{fattore di sicurezza} \times (\text{altezza modello} / 10 + \text{gioco delle mani} / 10) \times (1 / \text{velocità di apertura della macchina} + 1 / \text{velocità di chiusura della macchina}) \div 60$$

- o Sistema di espulsione manuale:

$$= 0,5 \times (10 / \text{velocità di apertura della macchina} + 10 / \text{velocità di chiusura della macchina}) \div 60$$

- Ejection and reset time → tempo di espulsione e reset:

- o Sistema di espulsione semiautomatico:

$$= (60 \times \text{tempo di apertura e chiusura della macchina} + 0,4 + 2 \times \text{numero di cavità di modelli per stampo}) \div 60$$

- o Sistema di espulsione manuale:

$$= (60 \times \text{tempo di apertura e chiusura della macchina} + 15,8 + 4 \times \text{numero di tiraggi laterali} + 6 \times \text{numero di elevatori} + 10 \times \text{numero di svitatori}) \div 60$$

- Operation time mold:

*Tempo di utilizzo dello stampo = (tempo di riempimento dello stampo × 60 + tempo di raffreddamento + tempo di espulsione e reset × 60) × numero di modelli / (numero di cavità per stampo × 60)*

- Process cost per pattern:

*Costo di processo per pattern = tempo di utilizzo dello stampo × costo orario della macchina / 60 × [(1/efficienza della produzione dell'anima) / 100]*

- Time to set up the mold on the injection machine → tempo di setup di un nuovo stampo all'interno della macchina di iniezione; valore costante che deriva da:

Opreazione	Parametro	Valore	Unità di misura
Pattern assembly	PatternAssemblySetupTime	10,000	min
Pattern assembly	SpecificTimeForAssemblePatter	0,400	kg/min
Cluster assembly	ClusterAssemblySetupTime	7,000	min
Cluster assembly	SpecificTimeForAssembleCluste	0,400	kg/min
Melting	PartWeightFactor	1,05	-
Cluster load and unload time	tLoadUnloadClusterAssembly	0,133	min
Cluster assembly	TimeSetupGates	0,500	min
Dissolving core	SpecificTimeForDissolvingCore	0,008	min/kg
Cleaning and etching	tLoadUnloadCleaning	0,133	min
Number of primer coats	NPrimerCoat	3	-
Number of backup coats	NBackupCoat	5	-
Meltout	tLoadUnloadMelting	0,133	min
Meltout	tDewaxing	10,000	min
Breakout	SpecificTimeForBreakout	0,033	min/kg
Breakout	tSetupPneumaticHammer	5,000	min
Blast Cleaning	SpecificTimeForBlastCleaning	0,033	min/kg
Cutoff	SpecificTimeForCutoff	0,008	min/kg
Cutoff	tSetupCutoff	5,000	min
Unitary price electricity	CEnergyUnitary	0,015	€/KWh
Pattern manufacturing	PatternSetupMoldTime	120,000	min
Core manufacturing	CoreSetupMoldTime	120,000	min

TABELLA 8

### Parametri considerati relativi allo stampo (PATTERN MOULD – Tab.14):

- Parting surface type → tipo di superficie di divisione da definire manualmente (superficie curva complessa con gradini, superficie curva complessa, più di quattro semplici gradini, da due a quattro semplici gradini o una semplice superficie curva, superficie di divisione in barattolo o contenente un singolo scalino e piano di separazione piatto).

- Projected area of the mold base:  
*Area di proiezione della base dello stampo = (lunghezza del modello + 75) × (larghezza del modello + 75)*
  
- Clearance factor 2 → secondo fattore di sicurezza
  
- Minimum clearance → gioco minimo:
  - Sistema di espulsione semiautomatico: = 75
  - Sistema di espulsione manuale: = 25
  
- Combined thickness:  
*Spessore combinato = altezza del modello + secondo fattore di sicurezza × gioco minimo*
  
- Ejector thickness → spessore estrattore:
  - Sistema di espulsione semiautomatico: = 100
  - Sistema di espulsione manuale: = 0
  
- Mold base thickness:  
*Spessore stampo = spessore combinato + spessore estrattore*
  
- Plates cost:  
*Costo piastre = 0,0215 × altezza del modello/10 × area di proiezione della base dello stampo/100 + 0,428 × area di proiezione della base dello stampo/100 × (numero di cavità per stampo + numero modelli) + 14,27 × area di proiezione della base dello stampo/100 + 32,18 × (numero di cavità per stampo + numero modelli)*
  
- Cost of the ejector, riser, and stripper plates (core) → costo piastre espulsione, alzata e svitamento:
  - Sistema di espulsione semiautomatico:  
 = 0,66 × area di proiezione della base dello stampo/100 + 366
  - Sistema di espulsione manuale: = 0

- Mold base cost:

*Costo della base dello stampo = costo delle piastre + costo delle piastre di espulsione, alzata e svitamento*

- Cost of the mold base with custom work → costo della base dello stampo con lavoro personalizzato:

- o Sistema di espulsione semiautomatico: =  $1,1 \times \text{costo della base dello stampo}$
- o Sistema di espulsione manuale: = 0

- Surface finish adjustment factor → fattore di regolazione della finitura superficiale che dipende dalla rugosità imposta dal progettista secondo la seguente tabella:

Appearance	Roughness ( $\mu\text{m}$ )	Percentage increase
Non critical	6,3 $\mu\text{m}$	10
Standard	3,2 $\mu\text{m}$	15
High gloss	1,6 $\mu\text{m}$	25

TABELLA 9: RUGOSITÀ E FATTORE DI REGOLAZIONE

- Manufacturing hours required to generate the shape:

*Ore di produzione per generare la forma =  $(0,3774 \times \text{numero di facce superficiali}^{1,2691}) \times (1 + \text{fattore di testurizzazione della superficie}/100) \times (1 + \text{fattore di regolazione della finitura superficiale}/100) \times 60$*

- Tolerance adjustment factor → fattore di regolazione della tolleranza che dipende dalla tolleranza imposta dal progettista secondo la Tab.10

tolerance	percentage increase
0,5	0
0,35	2
0,25	7,5
0,05	25

TABELLA 10: TOLLERANZA E FATTORE DI REGOLAZIONE

- Manufacturing hours for removal of material:

*Ore di produzione per la rimozione di materiale =  $[5 + (0,014 \times \text{area proiettata del modello}/100) \times \text{numero di cavità per stampo} \times (1 + \text{fattore di regolazione della tolleranza}/100) \times (1 + \text{fattore di testurizzazione della superficie}/100)] \times 60$*

- Manufacturing hours for retractable side-pulls → ore di produzione per traini laterali retrattili:

- o Sistema di espulsione semiautomatico: =  $16 \times \text{numero di tiraggi laterali} \times 60$
- o Sistema di espulsione manuale: =  $8 \times \text{numero di tiraggi laterali} \times 60$

- Pneumatic cylinder for sidepulls → costo dei cilindri pneumatici per i tiraggi laterali:

- Sistema di espulsione semiautomatico: = 30
  - Sistema di espulsione manuale: = 0
- Manufacturing hours for internal lifters → ore di produzione per i sollevatori interni:
- Sistema di espulsione semiautomatico: =  $40 \times \text{numero di sollevatori} \times 60$
  - Sistema di espulsione manuale: =  $8 \times \text{numero di sollevatori} \times 60$
- Actuators for lifters → costo per gli attuatori per sollevatori:
- Sistema di espulsione semiautomatico: = 30
  - Sistema di espulsione manuale: = 0
- Manufacturing hours for unscrewing devices → ore di produzione dei dispositivi di svitamento:
- Sistema di espulsione semiautomatico: =  $40 \times \text{numero di dispositivi di svitamento} \times 60$
  - Sistema di espulsione manuale: =  $8 \times \text{numero di dispositivi di svitamento} \times 60$
- Actuators for unscrewing devices → costo per gli attuatori per dispositivi di svitamento
- Sistema di espulsione semiautomatico: = 50
  - Sistema di espulsione manuale: = 0
- Manufacturing hours for pin ejection → ore di produzione per l'espulsione del pezzo
- Sistema di espulsione semiautomatico:  
=  $0,5 \times (\text{numero di cavità per stampo} \times \text{area proiettata del modello}/100)^{0,5} \times 60$
  - Sistema di espulsione manuale: = 0
- Parting surface adjustment factor → fattore di regolazione della superficie di divisione, dato dalla seguente tabella:

Parting Surface Type	fp - Factor
Flat parting plane	0
Canted parting surface or one containing a single step	1,25
Two to four simple steps or a simple curved surface	2
Greater than four simple steps	2,5
Complex curved surface	3
Complex curved surface with steps	4

TABELLA 11: FATTORE DI REGOLAZIONE DELLA SUP. DI DIVISIONE

- Manufacturing hours to shape of the parting surface:  
Ore di produzione per modellare la superficie di divisione =  $0,2 \times \text{fattore di regolazione della superficie di divisione} \times (\text{numero di cavità per stampo} \times \text{area proiettata del modello}/100)^{0,5} \times 60$
- Cost of manufacturing → COSTO DI PRODUZIONE  
= (ore di produzione per generare la forma + ore di produzione per la rimozione di materiale + ore di produzione per traini laterali retrattili + ore di produzione per i sollevatori interni + ore di produzione per i dispositivi di svitamento + ore di produzione per l'espulsione del pezzo + ore di produzione per modellare la superficie di divisione) ÷ 60 × prezzo orario dei lavoratori operanti in questa fase

Da cui si ricava:

- MOLD COST PATTERN → COSTO DELLO STAMPO  
= costo della base dello stampo + costo piastre espulsione, alzata e svitamento + costo di produzione + costo per gli attuatori per dispositivi di svitamento + costo per gli attuatori per sollevatori

Nella tabella di seguito vengono riportate le voci di tempi e costi che il modello fornisce per la fase di PATTERN MANUFACTURING, coincidenti con quelle riportate in Tab.2.

Process time	0,743	min
Setup time	160,000	min
Process cost	€ 0,733	€
Setup cost	€ 157,773	€
Material cost	€ 0,000	€
Consumable cost	€ 0,006	€
Tooling cost	€ 1.940,780	€

TABELLA 12: VOCI DI TEMPI E COSTI FINALI

- PROCESS TIME = tempo di utilizzo dello stampo ÷ efficienza
- SETUP TIME = tempo di setup di un nuovo stampo ÷ efficienza ÷ lotto produttivo
- PROCESS COST = tempo di processo ÷ 60 × tariffa oraria macchina + tempo di processo ÷ 60 × tariffa oraria operatore × percentuale di impiego del lavoratore
- SETUP COST = tempo di setup ÷ 60 × tariffa oraria macchina + tempo di setup ÷ 60 × tariffa oraria operatore × percentuale di impiego del lavoratore

- MATERIAL COST = 0 (è il costo del materiale del pezzo finale, che ovviamente non compare nella fase di produzione del modello in cera)
- CONSUMABLE COST = *costo materiale del modello*
- TOOLING COST = *costo dello stampo*

Number of patterns	NPatterns	1	-	manual input
Number of patterns (cavities) per mold	NMoldPatterns	1	-	manual input
Textured surface factor (pattern)	fTexturedSurfacePattern	0	%	pag. 578
Pattern material type	PatternMaterial	Wax 2: liquid	-	manual input
Pattern material density	pPattern	970,00	kg/m3	table 13.1
Pattern material thermal diffusivity	αPattern	0,09	mm2/s	table 13.1
Pattern material inject temperature	TInjectPattern	67,00	C°	table 13.1
Pattern material eject temperature	TEjectPattern	50,00	C°	table 13.1
Pattern material mold temperature	TMoldPattern	25,00	C°	table 13.1
Recommended injection pressure (pattern)	PinjectionRecommendedPattern	3,40	MN/m2	table 13.1
Pattern material unitary cost	PatternMaterialUnitaryCost	2,87	\$/kg	table 13.1
Cast material shrinkage allowance	CastMaterialShrinkage	6,00	%	table 13.5
Proportion of the runner volume (pattern)	VRunnerPercentagePattern	159,43	%	table 8.2
Pattern volume with runners		0,000002	m3	
Pattern volume with shrinkage and runners		0,000002	m3	
Pattern material cost	CMaterialPattern	0,0064	\$	eq. 13.1
Required shot size (pattern)	VshotPattern	0,000011	m3	table 8.2
Projected shot area (pattern)	ApShotPattern	1208	mm2	eq. 13.2
Maximum separating force (pattern)	FseparatingPattern	4,11	kN	example pag. 608
Machine clamping force (pattern)	FClampingMachinePattern	60,00	kN	table 13.6
Test machine validity	test machine validity	VERO		
Machine opening speed (pattern)	SpeedOpeningMachinePattern	40	mm/s	table 13.6
Machine closing speed (pattern)	SpeedClosingMachinePattern	50	mm/s	table 13.6
Wax injection flow rate (pattern)	QFlowWaxInjectionPattern	350000	mm3/s	table 13.6
Core load time	tCoreLoad	0,000	s	
Mold fill time (pattern)	tFillMoldPattern	0	s	eq. 13.3
Correction factor for wax type (pattern)	fcWaxPattern	1	ad.	pag. 610
Cooling time (pattern)	tCoolingPattern	16	s	eq. 13.4-13.5-13.6
Ejector system used (pattern)	EjectorSystemTypePattern	manual	-	manual input
Number of side pulls (pattern)	NSidePullsPattern	0	-	manual input
Number of lifters (pattern)	NLiftersPattern	0	-	manual input
Number of unscrewing (pattern)	NUnscrewingPattern	0	-	manual input
Clearance factor (pattern)	fClearancePattern	2	ad.	pag. 572
Hand clearance (pattern)	HandClearancePattern	100	mm	pag. 572
Open and close time (pattern)	tOpenClosePattern	0,0204	min	eq. 13.7-13.9
Ejection and reset time (pattern)	tEjectionResetPattern	17,0250	s	eq. 13.8-13.10
Operation time mold (pattern)	tOperationMoldPattern	0,5575	min	eq. 13.11
Process cost per pattern	CProcessPattern	0,2710	\$	eq. 13.12
Time to set up the mold on the injection machine	tSetupMold	120,0000	min	pag. 583

TABELLA 13: PARAMETRI CONSIDERATI NELLA PRODUZIONE DEL MODELLO

<b>Pattern mould</b>			
Parting surface type (pattern)	PartingSurfacePattern	Flat parting plane	-
Projected area of the mold base (pattern)	ApMoldBasePattern	9345,6	mm <sup>2</sup>
Clearance factor 2 (pattern)	f2ClearancePattern	2	ad.
Minimum clearance (pattern)	ClearanceMinimumPattern	25	mm
Combined thickness (pattern)	hCombinedPattern	54	mm
Ejector thickness (pattern)	hEjectorPattern	0	mm
Mold base thickness (pattern)	hMoldBasePattern	54	mm
Plates cost (pattern)	CPlatesPattern	1406,60001	\$
Cost of the ejector, riser, and stripper plates (core)	CEjectorRiserStripperPattern	0	\$
Mold base cost (pattern)	CMoldBasePattern	1406,60001	\$
Cost of the mold base with custom work (pattern)	CMoldBaseCustomPattern	0	\$
Surface finish adjustment factor (pattern)	fSurfaceFinishPattern	15	%
Manufacturing hours required to generate the shape (pattern)	tManufacturingShapePattern	741,6552522	min
Tolerance adjustment factor (pattern)	fTolerancePattern	7,5	%
Manufacturing hours for removal of material (pattern)	tManufacturingMaterialRemovePatte	326,704368	min
Manufacturing hours for retractable side-pulls (pattern)	tManufacturingSidepullsPattern	0	min
Pneumatic cylinder for sidepulls (pattern)	CPneumaticCylinderSidepullsPattern	0	\$
Manufacturing hours for internal lifters (pattern)	tManufacturingInternalliftersPattern	0	min
Actuators for lifters (pattern)	CActuatorsLifterPattern	0	\$
Manufacturing hours for unscrewing devices (pattern)	tManufacturingUnscrewingPattern	0	min
Actuators for unscrewing devices (pattern)	CActuatorsUnscrewingPattern	0	\$
Manufacturing hours for pin ejection (pattern)	tManufacturingEjectionPinPattern	0	min
Parting surface adjustment factor (pattern)	fPartingSurfacePattern	0	ad.
Manufacturing hours to shape of the parting surface (pattern)	tManufacturingPartingSurfacePattern	0	min
Cost of manufacturing (pattern)	CmanufacturingMoldPattern	534,18	€ \$
Mold cost pattern	CMoldPattern	1940,77982	\$

TABELLA 14: PARAMETRI CONSIDERATI RELATIVI ALLO STAMPO

## **2.2. MODELLI DI COSTO ADDITIVE MANUFACTURING**

I modelli di costo elaborati per i due processi alternativi di Additive Manufacturing SLA e MJP sono il risultato di un lavoro di ricerca e analisi che parte da una serie di informazioni e dati raccolti in rete, casi studio riportati da articoli scientifici, webinar e video illustrativi pubblicati dalle case costruttrici delle macchine di stampa, contatti diretti con aziende del territorio che si occupano di stampa 3D. Per quanto riguarda il processo di SLA, informazioni utili ai fini dell'analisi sono state fornite da Energy Group, azienda bolognese che si occupa di progettazione, supporto alla progettazione 3D e rivendita di stampanti. Per la MJP si è fatto riferimento a Microfound Srl, leader italiano nel settore industriale della microfusione a cera persa che ricorre a tecniche di fabbricazione additiva per la prototipazione rapida dei suoi prodotti.

Inoltre, sono state effettuate delle simulazioni dei processi di stampa, volte al reperimento di dati quali impostazioni di settaggio di stampa, tempo di stampa e materiale necessario, tramite il software Preform, di cui si parlerà in seguito.

Di seguito vengono illustrati dettagliatamente i due modelli di costo elaborati (SLA e MJP), strutturati a partire dall'ipotesi di un volume di produzione annuo massimo di 1000 pezzi, volume che permette di sfruttare quasi al massimo della sua capacità produttiva la stampante per la SLA (il più lento tra i due processi) e coerente con le esigenze produttive delle due aziende sopra citate che utilizzano i due processi come tecnologie di servizio per certi lotti produttivi (come si vedrà dai risultati finali).

Entrambi i modelli sono costituiti da 5 fogli di calcolo:

- 0) DATI
- 1) PRE-PROCESSING
- 2) BUILD
- 3) POST-PROCESSING
- 4) RIEPILOGO

## 2.2.1. SLA

### 0) DATI

COMPONENTE		MATERIALE		SIMULAZIONE DI STAMPA	
NOME	Fibbia senza gancio	NOME	CERA	MACCHINA	Form3
VOLUME PEZZO	829,75 mm <sup>3</sup>		Castable wax resin	NUMERO PEZZI	40
VOLUME TOTALE per stampa	33190,10 mm <sup>3</sup>	VOLUME CARTUCCIA	1 l	NUMERO STRATI	491
VOLUME TOTALE SUPPORTI per stampa	12679,90 mm <sup>3</sup>		1000 ml	VOLUME (pezzo+supporti)	45,87 ml
RUNNERS	7%	COSTO CARTUCCIA	249 €		45870 mm <sup>3</sup>
VOLUME TOTALE PEZZI+SUPPORTI	48193,31 mm <sup>3</sup>	COSTO al litro	249 €/l	TEMPO DI STAMPA	591 min
	48,19331 ml	COSTO al ml	0,249 €/ml		632,37 min
		COSTO MATERIALE per stampa	12,00 €		10,54 h
				SUPPORTO	Nessuna base
				SPESSORE STRATO	0,05 mm
				ORIENTAMENTO	Ottimizzato

ATTIVITA' PRODUTTIVA	
VOLUME DI PRODUZIONE	1000 pezzi/anno
PEZZI LOTTO	120 pezzi
N STAMPE PER LOTTO	3 stampe/lotto
STAMPANTI DISPONIBILI	1
N DI PEZZI PER STAMPANTE	1000 pezzi/anno
N DI PEZZI PER STAMPA	40
N DI STAMPE NECESSARIE	25 stampe/anno

FIGURA 34: SLA - DATI

- COMPONENTE

- NOME
- VOLUME PEZZO → ricavato dal modello CAD
- VOLUME TOTALE per stampa = “*volume pezzo*” × “*numero di pezzi per stampa (da SIMULAZIONE)*”
- VOLUME TOTALE SUPPORTI per stampa = “*volume totale per stampa*” - “*volume pezzo e supporti (da SIMULAZIONE)*”
- RUNNERS → % maggiorativa che tiene conto del volume aggiuntivo per gli attacchi di colata sul modello
- VOLUME TOTALE PEZZI+SUPPORTI = “*volume pezzo e supporti (da SIMULAZIONE)*” + “*(% di runners × “volume totale per stampa”)*”

COMPONENTE	
NOME	Fibbia senza gancio
VOLUME PEZZO	829,75 mm <sup>3</sup>
VOLUME TOTALE per stampa	33190,10 mm <sup>3</sup>
VOLUME TOTALE SUPPORTI per stampa	12679,90 mm <sup>3</sup>
RUNNERS	7%
VOLUME TOTALE PEZZI+SUPPORTI	48193,31 mm <sup>3</sup>
	48,19331 ml

TABELLA 15: SLA - DATI - COMPONENTE

- MATERIALE - CERA

- NOME → Castable wax resin (compatibile con la macchina considerata)
- VOLUME CARTUCCIA → formato da 1l reperibile in commercio
- COSTO CARTUCCIA
- COSTO AL LITRO = “costo cartuccia” ÷ “volume cartuccia”
- COSTO AL ml = “costo al litro” ÷ 1000
- COSTO MATERIALE PER STAMPA = “costo al ml” × “volume totale pezzi+supporti (da COMPONENTE)”

MATERIALE	
	CERA
NOME	Castable wax resin
VOLUME CARTUCCIA	1 l
	1000 ml
COSTO CARTUCCIA	249 €
COSTO al litro	249 €/l
COSTO al ml	0,249 €/ml
COSTO MATERIALE per stampa	12,00 €

TABELLA 16: SLA - DATI - MATERIALE



FIGURA 35: CARTUCCIA CASTABLE WAX RESIN

- SIMULAZIONE DI STAMPA

### SOFTWARE PREFORM

Preform permette di simulare il processo di stampa 3D a partire dal modello CAD del componente, da importare in formato .STL. I dati di input sono: STAMPANTE, TIPO DI RESINA, SPESSORE DELLO STRATO.

Si tratta poi di modellare il processo definendo ORIENTAMENTO, TIPOLOGIA DI SUPPORTI, NUMERO DI PEZZI PER STAMPA E LORO DISPOSIZIONE nella camera di stampa al fine di ottimizzare tempi e materiale necessario. Verificata la stampabilità dei pezzi, dalla simulazione il software fornisce come output: TEMPO DI STAMPA, STRATI E VOLUME DI MATERIALE NECESSARI.

Le simulazioni sono state effettuate per diversi casi (1 e 10 pezzi), fino ad arrivare al numero massimo di pezzi che satura la camera di stampa della macchina (40).

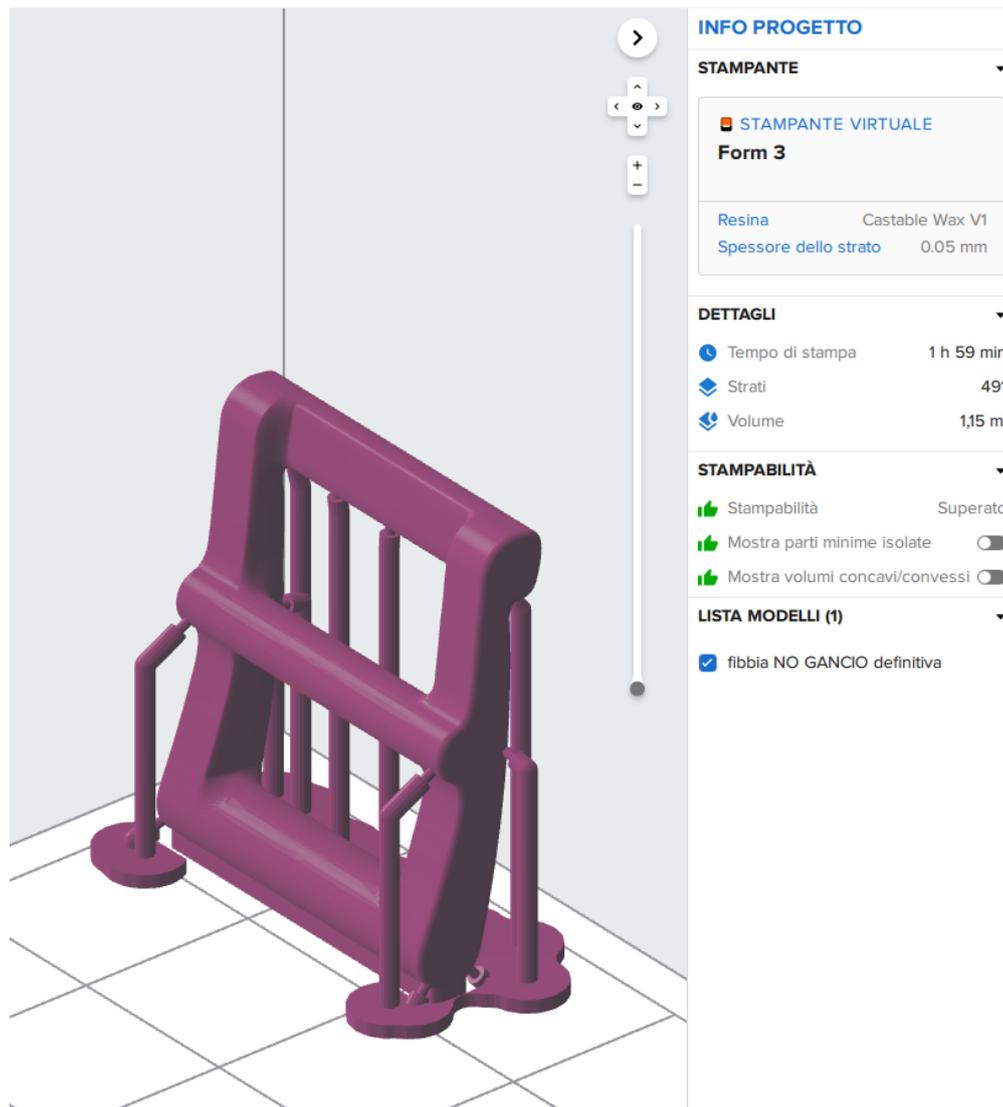


FIGURA 36: SIMULAZIONE DI STAMPA IN PREFORM

- MACCHINA → Form3 (vedi “DATI”; “MACCHINA”)
- NUMERO PEZZI → per entrambi i processi di AM le simulazioni sono state condotte per lotti produttivi da 1, 10, fino a 40 pezzi, quantità massima di pezzi stampabili per ogni stampa. Tale dato è un input del modello di costo che deve essere modificato a seconda della taglia del lotto produttivo considerata.
- NUMERO STRATI → dato di OUTPUT della simulazione; non cambia all’aumentare del numero di pezzi stampati.
- VOLUME (PEZZO+SUPPORTI) → dato di OUTPUT della simulazione; fornisce il volume di materiale (castable wax) necessario per la stampa del numero di pezzi impostato e relativi supporti. Tale dato è un input del modello di costo che deve essere modificato a seconda della taglia del lotto produttivo.

- TEMPO DI STAMPA → dato di OUTPUT della simulazione; fornisce il tempo necessario per la stampa del numero di pezzi impostato con relativi supporti. Tale dato è un input del modello di costo che ovviamente aumenta e deve essere modificato all'aumentare del lotto produttivo.
- SUPPORTO → tipologia di supporti scelta in fase di modellazione del processo di stampa.
- SPESSORE STRATO → spessore del layer in direzione z che viene depositato ad ogni passata della testina di stampa e del raggio laser; 0,05mm è lo spessore comunemente usato in ambito industriale.
- ORIENTAMENTO → dei pezzi nella camera di stampa, definito in automatico dal software.

SIMULAZIONE DI STAMPA	
MACCHINA	Form3
NUMERO PEZZI	40
NUMERO STRATI	491
VOLUME (pezzo+supporti)	45,87 ml
	45870 mm <sup>3</sup>
TEMPO DI STAMPA	591 min
	632,37 min
	10,54 h
SUPPORTO	Nessuna base
SPESSORE STRATO	0,05 mm
ORIENTAMENTO	Ottimizzato

TABELLA 17: SLA - DATI - SIMULAZIONE DI STAMPA

- ATTIVITÀ PRODUTTIVA

- VOLUME DI PRODUZIONE
- PEZZI LOTTO → dato di input del modello di costo da modificare a seconda della taglia del lotto (1, 10, 40 o multipli di 40 pezzi).
- NUMERO STAMPE PER LOTTO =  $\text{"pezzi lotto"} \div \text{"numero pezzi (da SIMULAZIONE)"};$  considerando un numero massimo di 40 pezzi per ogni stampa.
- STAMPANTI DISPONIBILI
- NUMERO DI PEZZI PER STAMPANTE =  $\text{"volume di produzione"} \div \text{"stampanti disponibili"}$
- NUMERO DI PEZZI PER STAMPA → vedi numero pezzi (da SIMULAZIONE)
- NUMERO DI STAMPE NECESSARIE =  $\text{"numero di pezzi per stampante"} \div \text{"numero di pezzi per stampa"}$

ATTIVITA' PRODUTTIVA		
VOLUME DI PRODUZIONE	1000	pezzi/anno
PEZZI LOTTO	120	pezzi
N STAMPE PER LOTTO	3	stampe/lotto
STAMPANTI DISPONIBILI	1	
N DI PEZZI PER STAMPANTE	1000	pezzi/anno
N DI PEZZI PER STAMPA	40	
N DI STAMPE NECESSARIE	25	stampe/anno

TABELLA 18: SLA - DATI - ATTIVITÀ PRODUTTIVA

- **MACCHINA**

La macchina considerata per il processo di Stereolitografia è la Form3 della casa costruttrice Formlabs Inc. azienda statunitense che sviluppa e commercializza stampanti 3D. Caratteristiche tecniche principali sono:

- risoluzione xy = 25 microns
- dimensione del punto laser = 85 microns
- potenza laser = 250mW
- volume di stampa ( $l \cdot p \cdot a$ ) = 14,5 \* 14,5 \* 18,5cm
- spessore dello strato = 25-300 microns
- modellazione del processo di stampa con software Preform compatibile

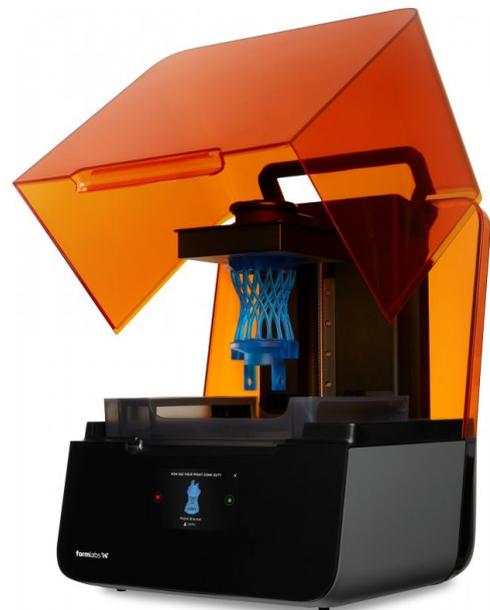


FIGURA 37: STAMPANTE FORM3

- COSTO FORM3 → prezzo di listino della macchina dallo store della casa costruttrice
- COSTO ENERGIA
- COSTO MANODOPERA
- TASSO DI INTERESSE → necessario per il calcolo dei costi di ammortamento
- ANNI AMMORTAMENTO → anni di presunto utilizzo della macchina
- COSTO AMMORTAMENTO (ANNUALE):

$$S = V'_0 \left[ \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right] \quad \text{con } V'_0 = \text{costo Form3}$$

$i = \text{tasso di interesse}$   
 $n = \text{anni ammortamento}$

- ORE DI IMPIEGO MACCHINA → in un anno la Form3 viene impiegata nella fase di PRE-PROCESSING per le operazioni di caricamento materiale, montaggio e riempimento piatto, durante le quali la macchina è accesa, e nella fase di BUILD, ovvero di stampa vera e propria, per un numero di volte pari al numero di stampe necessarie all'anno; a ciò si aggiunge il tempo di installazione della macchina stessa previsto solo per la prima stampa realizzata:  

$$\{["tempo di stampa (da SIMULAZIONE)" + "tempo caricamento materiale e montaggio piatto (da PRE-PROCESSING)" + "tempo riempimento piatto (da PRE-PROCESSING)"] \times "numero di stampe necessarie (da ATTIVITÀ PRODUTTIVA)"} + "tempo installazione (da PRE-PROCESSING)"$$
- COSTO ORARIO AMMORTAMENTO = "costo ammortamento" ÷ "ore impiego macchina"
- NUMERO OPERATORI → si considera la macchina servita in tutte le sue operazioni da un unico operatore.
- POTENZA

MACCHINA (Form3)	
Costo Form3	3299 €
Costo ENERGIA	0,06 €/kWh
Costo MANODOPERA	30 €/h
TASSO DI INTERESSE	0,1
ANNI AMMORTAMENTO	3
Costo AMMORTAMENTO	1326,58 €/anno
ORE di IMPIEGO MACCHINA	270,74 h/anno
Costo ORARIO AMMORTAMENTO	4,90 €/h
NUMERO OPERATORI	1
POTENZA	0,22 kW

TABELLA 19: SLA - DATI - MACCHINA

**DATI DI INPUT DEL MODELLO (da impostare ad ogni valutazione):**

- **NUMERO PEZZI (SIMULAZIONE DI STAMPA)**
- **VOLUME pezzo+supporti (SIMULAZIONE DI STAMPA)**
- **TEMPO DI STAMPA (SIMULAZIONE DI STAMPA)**
- **VOLUME DI PRODUZIONE (ATTIVITÀ PRODUTTIVA)**
- **PEZZI LOTTO (ATTIVITÀ PRODUTTIVA)**



- TEMPO UTILIZZO MACCHINA → per il calcolo del tempo di utilizzo della macchina nella fase di pre-processing va fatta una distinzione tra lotti produttivi superiori e non a 40 pezzi (quantità massima di pezzi per ogni stampa).
  - LOTTI DA 1, 10 O 40 PEZZI: il tempo di utilizzo della macchina è pari al tempo di setup (vedi sopra)
  - LOTTI MULTIPLI DI 40: il tempo di setup viene considerato globalmente solo relativamente alla prima stampa dei primi 40 pezzi (in cui rientra anche il tempo per l'installazione della macchina), a questo si aggiungono i tempi di setup delle stampe successive decurtati del tempo di installazione:
 
$$\text{"tempo setup macchina"} + [(\text{"tempo caricamento materiale e montaggio piatto"} + \text{"tempo riempimento piatto"}) \times (\text{"numero di stampe necessarie (da ATTIVITÀ PRODUTTIVA)} - 1)]$$
- CONSUMO DI ENERGIA =  $\text{"tempo utilizzo macchina"} \times \text{"potenza"}$  (da DATI-MACCHINA)
- TEMPO IMPIEGO OPERATORE
  - LOTTI DA 1, 10 O 40 PEZZI: l'operatore viene impiegato nelle operazioni di installazione, caricamento materiale e montaggio piatto e nella simulazione:
 
$$\text{"tempo installazione"} + \text{"tempo caricamento materiale e montaggio piatto"} + \text{"tempo simulazione"}$$
  - LOTTI MULTIPLI DI 40: l'operatore viene impiegato nelle operazioni sopracitate soltanto per la prima stampa dei primi 40 pezzi, per le stampe successive si considera solo l'operazione di caricamento materiale e montaggio piatto:
 
$$\text{"tempo installazione"} + \text{"tempo caricamento materiale e montaggio piatto"} + \text{"tempo simulazione"} + [(\text{"tempo caricamento materiale e montaggio piatto"} \times (\text{"numero di stampe necessarie (da ATTIVITÀ PRODUTTIVA)} - 1))]$$

## ▪ COSTI

- COSTO IMPIEGO OPERATORE =  $\text{"tempo impiego operatore"} \times \text{"costo manodopera (da DATI-MACCHINA)"}$
- QUOTA DI AMMORTAMENTO =  $\text{"tempo utilizzo macchina"} \times \text{"costo orario ammortamento (da DATI-MACCHINA)"}$
- COSTO ENERGIA =  $\text{"consumo di energia"} \times \text{"costo energia (da DATI-MACCHINA)"}$

### TEMPO PRE-PROCESSING:

- LOTTI DA 1, 10 O 40 PEZZI: *“tempo setup macchina” + “tempo simulazione”*
- LOTTI MULTIPLI DI 40: *“tempo setup macchina” + “tempo simulazione” + [(“tempo caricamento materiale e montaggio piatto” + “tempo riempimento piatto”) × (“numero di stampe necessarie (da ATTIVITÀ PRODUTTIVA) - 1”)]*

**COSTO PRE-PROCESSING** = *“costo impiego operatore” + “quota di ammortamento” + “costo energia”*

## 2) BUILD

La fase di build corrisponde al processo di stampa 3D vero e proprio, in cui la macchina costruisce strato per strato il pezzo.

BUILD					
BUILD			IMPIEGO OPERATORE	4%	
tempo di stampa	10,54	h	TEMPO IMPIEGO OPERATORE	1,26474	h
			CONSUMO DI ENERGIA	6,95607	kWh
TEMPO BUILD	10,54	h			
TEMPO BUILD TOTALE	31,6185	h			
			COSTI		
			COSTO IMPIEGO OPERATORE	37,94	€
			QUOTA DI AMMORTAMENTO	153,74	€
			COSTO ENERGIA	0,42	€
			COSTO MATERIALE	36,00	€
			COSTO BUILD	228,10	€

FIGURA 39: SLA - BUILD

### ▪ TEMPI

- tempo di stampa (da DATI-SIMULAZIONE)

**TEMPO BUILD TOTALE** = *“tempo di stampa” × “numero di stampe necessarie (da DATI-ATTIVITÀ PRODUTTIVA)”*

Considerando una percentuale del 4% di impiego dell'operatore durante il funzionamento a regime della macchina, si ricavano:

- TEMPO IMPIEGO OPERATORE =  $4\% \times \text{“tempo build totale”}$
- CONSUMO DI ENERGIA = *“potenza (da DATI-MACCHINA)” × “tempo build totale”*

▪ **COSTI**

- COSTO IMPIEGO OPERATORE = “costo manodopera (da DATI-MACCHINA)” × “tempo impiego operatore”
- QUOTA DI AMMORTAMENTO = “costo orario ammortamento (da DATI-MACCHINA)” × “tempo build totale”
- COSTO ENERGIA = “costo energia (da DATI-MACCHINA)” × “tempo build totale”
- COSTO MATERIALE = “costo materiale per stampa (da DATI-MATERIALE)” × “numero di stampe necessarie (da DATI-ATTIVITÀ PRODUTTIVA)”

**COSTO BUILD** = “costo impiego operatore” + “quota di ammortamento” + “costo energia” + “costo materiale”

**3) POST-PROCESSING**

Nella fase di post-processing vengono effettuate le operazioni di finitura superficiale del modello in cera necessarie per renderlo utilizzabile nel processo di microfusione. Tali operazioni sono:

- rimozione della resina (cera) in eccesso sul pezzo derivante dal processo di stampa, tramite un bagno di alcol isopropilico → si utilizza la FormWash (vedi MACCHINA)
- rimozione dei supporti → manualmente
- levigatura dei pezzi

POST-PROCESSING				
<b>MACCHINA (FormWash)</b>		<b>ALCOL ISOPROPILICO</b>		
Costo FormWash	499 €	VOLUME PER LAVAGGIO	8 l	
Costo ENERGIA	0,06 €/kWh	COSTO	8 €/l	
Costo MANODOPERA	30 €/h	PEZZI PER LAVAGGIO	40	
TASSO DI INTERESSE	0,1			
ANNI AMMORTAMENTO	3			
COSTO AMMORTAMENTO	200,66 €/anno			
ORE di IMPIEGO MACCHINA	12,5 h/anno			
COSTO ORARIO AMMORTAMENTO	16,05 €/h			
NUMERO OPERATORI	1			
POTENZA	50 W			
	0,05 kW			

FIGURA 40: SLA – POSTPROCESSING – MACCHINA E ALCOL ISOPROPILICO

- MACCHINA (FormWash)

La FormWash, prodotta dalla casa costruttrice Formlabs, è la macchina con cui viene effettuato il bagno di alcol isopropilico, solvente che ha la funzione di rimuovere la resina non polimerizzata dalla superficie dei pezzi. Viene solitamente venduta insieme alla stampante Form3 o in un pacchetto che contiene FormWash, Form3 e FormCure, altra macchina utilizzata per la finitura dei pezzi, in particolare per la fotopolimerizzazione post stampa, operazione non considerata nel presente modello di costi in quanto non prevista per pezzi in cera.



FIGURA 41: FORMWASH

- Costo FormWash → prezzo di listino della macchina dallo store della casa costruttrice
- Costo ENERGIA
- Costo MANODOPERA
- TASSO DI INTERESSE
- ANNI AMMORTAMENTO
- COSTO AMMORTAMENTO → vedi formula per la Form3 (da DATI-MACCHINA)
- ORE DI IMPIEGO MACCHINA = *“tempo rimozione resina” × “numero di stampe necessarie (da DATI-ATTIVITÀ PRODUTTIVA)”*
- COSTO ORARIO AMMORTAMENTO = *“costo ammortamento” ÷ “ore di impiego macchina”*
- NUMERO OPERATORI
- POTENZA

- ALCOL ISOPROPILICO (IPA)

Per l’analisi si considera un bagno di alcol di 8 litri, da cambiare ogni 200 pezzi prodotti. Si assume inoltre che il lavaggio tramite FormWash venga effettuato al termine di ogni processo di stampa realizzato, per cui il numero di pezzi per ogni lavaggio coincide con il numero di pezzi stampati in quel lotto, inseriti nella vasca della FormWash per un massimo di 40 alla volta.

- VOLUME PER LAVAGGIO
- COSTO
- PEZZI PER LAVAGGIO → *“numero pezzi (da DATI-SIMULAZIONE)”*

## ▪ TEMPI

### • RIMOZIONE RESINA

- distacco pezzi e piattaforma → operazioni preliminari al lavaggio tra cui: distacco della piattaforma di stampa dalla macchina e pulizia, distacco dei pezzi dalla piattaforma di stampa
- tempo setup FormWash → accensione FormWash, riempimento vasca, inserimento dei pezzi nell'alcol e definizione delle impostazioni di lavaggio (temperatura e tempo)
- tempo lavaggio
- asciugatura → tramite un getto di aria fredda a bassa velocità, necessaria per evitare che gli eventuali residui di IPA vadano a corrodere i pezzi stampati; si considera anche il tempo necessario all'operatore per estrarre i pezzi dalla FormWash
- TEMPO RIMOZIONE RESINA = *"tempo setup FormWash" + "tempo lavaggio"*

### • RIMOZIONE SUPPORTI E LEVIGATURA

- tempo → necessario per un singolo pezzo
- TEMPO RIMOZIONE SUPPORTI E LEVIGATURA → necessario per tutto il lotto di pezzi; *"tempo" × "pezzi per lavaggio"*

Da cui si ricavano:

- TEMPO UTILIZZO MACCHINA = *"tempo rimozione resina" × "numero stampe per lotto (da DATI-ATTIVITÀ PRODUTTIVA)"*
- TEMPO IMPIEGO OPERATORE = *("tempo setup FormWash" + "tempo rimozione supporti e levigatura") × "numero stampe per lotto (da DATI-ATTIVITÀ PRODUTTIVA)"*
- CONSUMO ENERGIA = *"tempo utilizzo macchina" × "potenza"*

## ▪ COSTI

- COSTO IMPIEGO OPERATORE = *"tempo impiego operatore" × "costo manodopera"*
- QUOTA DI AMMORTAMENTO = *"costo orario ammortamento" × "tempo utilizzo macchina"*
- COSTO ENERGIA = *"costo energia" × "consumo energia"*
- COSTO ALCOL → ogni bagno di 8 litri di alcol viene utilizzato per un massimo di 200 pezzi, per cui ogni pezzo avrà un costo unitario di lavaggio pari a *("volume per lavaggio" × "costo") ÷ 200*; da cui il costo dell'alcol per ogni lavaggio corrispondente ad ogni lotto produttivo è dato da:

*"costo unitario" × "pezzi lotto (da DATI-ATTIVITÀ PRODUTTIVA)"*



#### 4) RIEPILOGO

Si riepilogano le voci di costo calcolate suddivise nelle 3 fasi già menzionate di pre-processing, build e post-processing, raggruppate nelle categorie a cui sono riferite (MACCHINA, OPERATORE, ENERGIA, MATERIALI, CONSUMABILI) e relativi tempi.

	costo MACCHINA	costo OPERATORE	costo ENERGIA	costo MATERIALI	costo CONSUMABILI	COSTO TOTALE	TEMPI
PRE-PROCESSING	9,72 €	47,50 €	0,03 €	-	-	57,25 €	2,083333 h
BUILD	153,74 €	37,94 €	0,42 €	36,00 €	-	228,10 €	31,6185 h
POST-PROCESSING	12,04 €	1.822,50 €	0,00 €	-	38,40 €	1.872,94 €	61,5 h
TOTALE	175,51 €	1.907,94 €	0,45 €	36,00 €	38,40 €	2.158,30 €	95,20183 h

TABELLA 20: SLA - RIEPILOGO

Da cui si ricavano **TEMPI E COSTI UNITARI**:

<b>COSTO AL PEZZO</b>	<b>17,99 €</b>
<b>TEMPO AL PEZZO</b>	<b>0,793349 h</b>
	<b>47,60092 min</b>

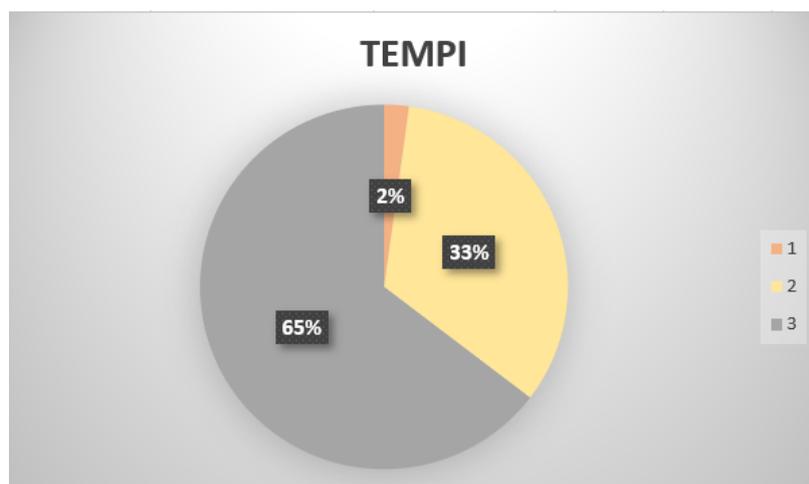


FIGURA 43: SLA - GRAFICI A TORTA COSTI E TEMPI



- SIMULAZIONE DI STAMPA

Per la simulazione del processo di MultiJet Printing è stato utilizzato ancora una volta il software Preform. In questo caso, non essendo possibile la simulazione del processo tramite la stampante ProJet2500 (non selezionabile in Preform), ma essendo nota la velocità di stampa della macchina (102,5cm<sup>3</sup>/h) e assumendo come ipotesi ragionevole di stampare lo stesso numero di pezzi, con la stessa disposizione nella camera di stampa e con gli stessi supporti, è stato calcolato il tempo di stampa, moltiplicando il volume di cera necessario (fornito dal software come output della simulazione) per la velocità di stampa.

- TEMPO DI STAMPA = *“volume (pezzo+supporti)”* × *“velocità di stampa (da MACCHINA)”*

SIMULAZIONE DI STAMPA	
MACCHINA	ProJet 2500 IC
NUMERO PEZZI	40
VOLUME (pezzo+supporti)	45870 mm <sup>3</sup>
	45,87 cm <sup>3</sup>
TEMPO DI STAMPA	0,447512 h
	0,478838 h
SUPPORTO	Nessuna base
SPESSORE STRATO	0,05 mm
ORIENTAMENTO	Ottimizzato

TABELLA 22: MJP - DATI - SIMULAZIONE DI STAMPA

- ATTIVITÀ PRODUTTIVA (vedi modello di costo SLA)

- MACCHINA (ProJet 2500 IC)

La macchina utilizzata per il processo di MultiJet Printing è la ProJet 2500 IC, prodotta e commercializzata da 3DSystems, azienda statunitense specializzata nella produzione di stampanti 3D, materiali stampabili e software di grafica 3D. Principali caratteristiche tecniche sono:

- volume di stampa: 294 × 211 × 144 mm
- velocità di stampa: 205 cm<sup>3</sup>/h

Le voci di costo considerate nel modello della MJP sono le stesse del modello della SLA, a cui si aggiungono:

- VELOCITÀ DI STAMPA → la velocità di stampa riportata tra le specifiche tecniche della stampante si riferisce ad un valore ottimale, ovvero nelle migliori condizioni di utilizzo della macchina stessa; al fine dell'analisi si considera un valore decurtato del 50%.
- COSTO MANUTENZIONE → valutato come il 3% del costo di acquisto della macchina

- COSTO ORARIO MANUTENZIONE = *“costo manutenzione” ÷ “ore impiego macchina”*
- ORE DI IMPIEGO MACCHINA → si considera che in un anno la ProJet viene impiegata nella fase di PRE-PROCESSING per le operazioni di caricamento materiale, montaggio piatto e riscaldamento e nella fase di BUILD, per un numero di volte pari al numero di stampe necessarie all’anno; a ciò si aggiunge il tempo di installazione della macchina stessa previsto solo per la prima stampa realizzata:

*{[“tempo di stampa (da SIMULAZIONE)” + “tempo caricamento materiale e montaggio piatto (da PRE-PROCESSING” + “tempo riscaldamento (da PRE-PROCESSING)”] × “numero di stampe necessarie (da ATTIVITÀ PRODUTTIVA)”} + “tempo installazione (da PRE-PROCESSING)”*.

MACCHINA (ProJet 2500 IC)		
COSTO	80000	€
costo ENERGIA	0,06	€/kWh
costo MANODOPERA	30	€/h
TASSO DI INTERESSE	0,1	
ANNI AMMORTAMENTO	5	
COSTO AMMORTAMENTO	21103,8	€/anno
ORE di IMPIEGO MACCHINA	21,30428	h/anno
costo ORARIO AMMORTAMENTO	990,59	€/h
NUMERO OPERATORI	1	
POTENZA	2,5	kW
VELOCITA' DI STAMPA	102,5	cm <sup>3</sup> /h
COSTO MANUTENZIONE	2400	€/anno
costo ORARIO MANUTENZIONE	112,65	€/h

TABELLA 23: MJP - DATI - MACCHINA



FIGURA 46: STAMPANTE PROJET 2500 IC

**DATI DI INPUT DEL MODELLO (da impostare ad ogni valutazione):**

- **NUMERO PEZZI (SIMULAZIONE)**
- **VOLUME pezzo+supporti (SIMULAZIONE)**
- **VOLUME DI PRODUZIONE (ATTIVITÀ PRODUTTIVA)**
- **PEZZI LOTTO (ATTIVITÀ PRODUTTIVA)**

## 1) PRE-PROCESSING

PRE-PROCESSING					
SETUP MACCHINA					
caricamento materiale e montaggio piatto	10	min			
	0,166667	h			
riscaldamento macchina	15	min	TEMPO UTILIZZO MACCHINA	2,25	h
	0,25	h	CONSUMO DI ENERGIA	5,625	kWh
installazione	1	h	TEMPO IMPIEGO OPERATORE	1,583333	h
TEMPO SETUP MACCHINA	1,416667	h			
SIMULAZIONE			COSTI		
TEMPO SIMULAZIONE	5	min	COSTO IMPIEGO OPERATORE	47,5	€
	0,083333	h	QUOTA AMMORTAMENTO	2030,29	€
			COSTO ENERGIA	0,34	€
			QUOTA MANUTENZIONE	230,89	€
TEMPO PRE-PROCESSING	2,333333	h			
			COSTO PRE-PROCESSING	2309,01	€

FIGURA 47: MJP - PREPROCESSING

Le voci di tempi e costi considerate nell'analisi e relative modalità di calcolo sono le stesse della fase di pre-processing del modello della SLA; si sostituisce solo la voce "tempo riscaldamento" alla voce "tempo riempimento piatto" e tra le voci di costo si aggiunge:

- QUOTA MANUTENZIONE = *"tempo utilizzo macchina" × "costo orario manutenzione (da DATI-MACCHINA)"*

Si ottengono in maniera analoga al modello della SLA:

**TEMPO PRE-PROCESSING** e **COSTO PRE-PROCESSING** (sommando alle voci di costo anche la "quota manutenzione").

## 2) BUILD

Voci di tempi e costi considerate e relative modalità di calcolo sono le stesse della fase di build del modello della SLA; per il calcolo del COSTO MATERIALE si considerano i costi di entrambe le cere utilizzate (pezzo e supporti) e si aggiunge:

- QUOTA MANUTENZIONE = *"tempo di build totale" × "costo orario manutenzione (da DATI-MACCHINA)"*

Si ottengono in maniera analoga al modello della SLA:

**TEMPO DI BUILD TOTALE** e **COSTO BUILD** (sommando alle voci di costo anche la “quota manutenzione”).

BUILD					
<b>BUILD</b>			IMPIEGO OPERATORE	4%	
tempo di stampa	0,478838	h	TEMPO IMPIEGO OPERATORE	0,057461	h
			CONSUMO DI ENERGIA	3,591285	kWh
<b>TEMPO DI BUILD</b>	0,478838	h	<b>COSTI</b>		
<b>TEMPO DI BUILD TOTALE</b>	1,436514	h	COSTO IMPIEGO OPERATORE	1,72	€
			QUOTA AMMORTAMENTO	1296,24	€
			COSTO ENERGIA	0,22	€
			COSTO MATERIALE	38,96	€
			QUOTA MANUTENZIONE	147,41	€
			<b>COSTO BUILD</b>	<b>1484,55</b>	<b>€</b>

FIGURA 48: MJP - BUILD

### 3) POST-PROCESSING

Le operazioni di finitura necessarie sui pezzi ottenuti dal processo di MultiJet Printing sono:

- rimozione supporti → mediante bagno di alcol isopropilico che scioglie la cera solubile con cui vengono realizzati i supporti
- pulizia finale → semplice lavaggio con acqua miscelata manualmente ad una temperatura intorno ai 35°C

Non è previsto l'utilizzo di ulteriori macchinari per la fase di post-produzione (no FormWash).

POST-PROCESSING					
<b>ALCOL ISOPROPILICO</b>			<b>RIMOZIONE SUPPORTI</b>		
VOLUME PER LAVAGGIO	9	l	distacco pezzi e piattaforma	10	min
COSTO	8	€/l		0,166667	h
PEZZI PER LAVAGGIO	40		tempo setup bagno	5	min
				0,083333	h
			tempo bagno alcol	60	min
				1	h
			asciugatura	5	min
				0,083333	h
			<b>PULIZIA</b>		
			lavaggio con acqua	5	min
				0,083333	h
			<b>TEMPO POST-PROCESSING</b>	4,25	h
			TEMPO IMPIEGO OPERATORE	1	h
			<b>COSTI</b>		
			COSTO IMPIEGO OPERATORE	30	€
			COSTO ALCOL	43,20	€
			<b>COSTO POST-PROCESSING</b>	<b>73,20</b>	<b>€</b>

FIGURA 49: MJP - POSTPROCESSING

- **ALCOL ISOPROPILICO**

Per l'analisi si considera un bagno di alcol di 9 litri, da cambiare ogni 200 pezzi prodotti. Si assume che il bagno nell'alcol venga effettuato al termine di ogni processo di stampa realizzato, per cui il numero di pezzi per ogni lavaggio coincide con il numero di pezzi stampati in quel lotto.

- VOLUME PER LAVAGGIO
- COSTO
- PEZZI PER LAVAGGIO → “numero pezzi (da DATI-SIMULAZIONE)”

- **TEMPI**

- **RIMOZIONE SUPPORTI**

- distacco pezzi e piattaforma (vedi SLA)
- tempo setup bagno
- tempo bagno alcol
- asciugatura (vedi SLA)

- **PULIZIA**

- lavaggio con acqua

Da cui si ricava:

- TEMPO IMPIEGO OPERATORE = (“tempo setup bagno” + “tempo lavaggio con acqua”) × “numero stampe per lotto (da DATI-ATTIVITÀ PRODUTTIVA)”

- **COSTI**

- COSTO IMPIEGO OPERATORE = “tempo impiego operatore” × “costo manodopera”
- COSTO ALCOL → stesse modalità di calcolo riportate nella fase di post-processing della SLA

**TEMPO POST-PROCESSING** = (“tempo setup bagno” + “tempo bagno alcol” + “tempo lavaggio con acqua”) × “numero stampe per lotto (da DATI-ATTIVITÀ PRODUTTIVA)”

**COSTO POST-PROCESSING** = “costo impiego operatore” + “costo alcol”

#### 4) RIEPILOGO

Si riepilogano le voci di costo calcolate suddivise nelle 3 fasi già menzionate di pre-processing, build e post-processing, raggruppate nelle categorie a cui sono riferite (MACCHINA, OPERATORE, ENERGIA, MATERIALI, CONSUMABILI) e relativi tempi.

	costo <b>MACCHINA</b>	costo <b>OPERATORE</b>	costo <b>ENERGIA</b>	costo <b>MATERIALI</b>	costo <b>CONSUMABILI</b>	<b>TOTALE</b>	<b>TEMPI</b>
<b>PRE-PROCESSING</b>	2.261,18 €	47,50 €	0,34 €	-	-	<b>2.309,01 €</b>	<b>2,333333 h</b>
<b>BUILD</b>	1.443,65 €	1,72 €	0,22 €	38,96 €	-	<b>1.484,55 €</b>	<b>1,436514 h</b>
<b>POST-PROCESSING</b>	-	30,00 €	-	-	43,20 €	<b>73,20 €</b>	<b>4,25 h</b>
<b>TOTALE</b>	<b>3.704,83 €</b>	<b>79,22 €</b>	<b>0,55 €</b>	<b>38,96 €</b>	<b>43,20 €</b>	<b>3.866,76 €</b>	<b>8,019847 h</b>

TABELLA 24: MJP - RIEPILOGO

Da cui si ricavano **TEMPIE COSTI UNITARI:**

<b>COSTO AL PEZZO</b>	<b>32,22 €</b>
<b>TEMPO AL PEZZO</b>	<b>0,066832 h</b>
	<b>4,009924 min</b>

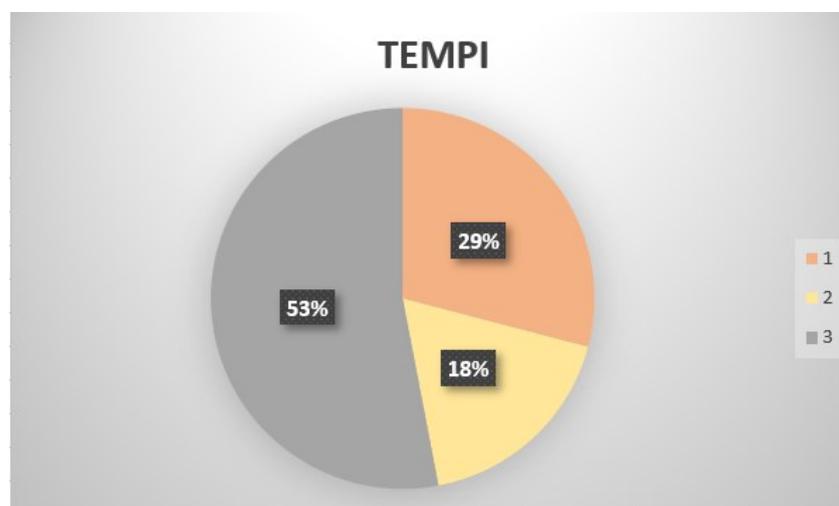
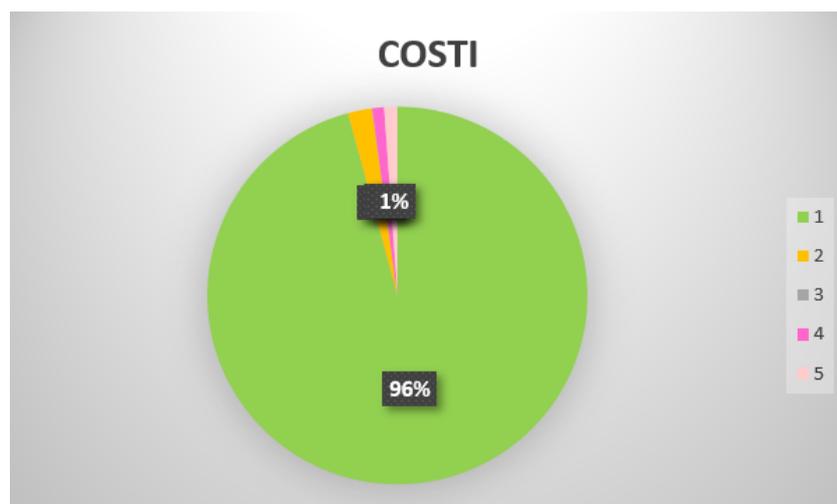


FIGURA 50: MJP - GRAFICI A TORTA COSTI E TEMPI

### 3. CASO STUDIO

Nell'analisi in questione, la valutazione economica e il confronto tra le differenti alternative di produzione sono stati effettuati utilizzando come caso studio un modello di accessorio moda fornito, come detto in precedenza, dall'azienda Santoni Srl. Si tratta in particolare di una fibbia per cinture, in cui però non è prevista la presenza del gancio centrale per la chiusura della cintura, che si considera prodotto separatamente.

Con riferimento a tale accessorio sono stati ricavati e impostati i dati di input dei modelli di costo di Investment Casting, SLA e MJP, presentati nel capitolo precedente, da cui sono stati ottenuti i costi unitari di produzione per ogni processo, relativi a differenti volumi di produzione e taglie del lotto produttivo.



FIGURA 51: ACCESSORIO MODA - FIBBIA PER CINTURE, SANTONI SRL

Di tale accessorio sono stati forniti i modelli CAD, da cui si è partiti per l'analisi. In particolare, dal software Rhinoceros sono state ricavate le informazioni geometriche necessarie per la compilazione della tabella "COMPONENTE" nel foglio "DATI" dei modelli di costo di SLA e MJP, e delle voci relative a "lunghezza", "larghezza", "volume" e "numero di patch" del componente nel modello di costo di Investment Casting (vedi cap. 2)

Il modello CAD è stato poi importato in formato STL nel software Preform, dove sono state realizzate le simulazioni del processo di stampa per ricavare gli input dei modelli di costo relativi a "tempo di stampa" e "volume" di materiale necessario.

Le simulazioni sono state condotte per stampe da 1, 10 e 40 pezzi, impostando le seguenti condizioni:

- Stampante: Form3
- Materiale: Castable wax resin
- Spessore del layer: 50 micron
- Orientamento automatico per la minimizzazione dei supporti
- Supporti senza basi per abbattere i tempi di stampa e il consumo di materiale.

Sono stati ottenuti come output:

- Tempo di stampa: 1pz → 119min; 10pz → 230min; 40pz → 591min
- Volume di materiale: 1pz → 1,15ml; 10pz → 11,54ml; 40pz → 45,87ml

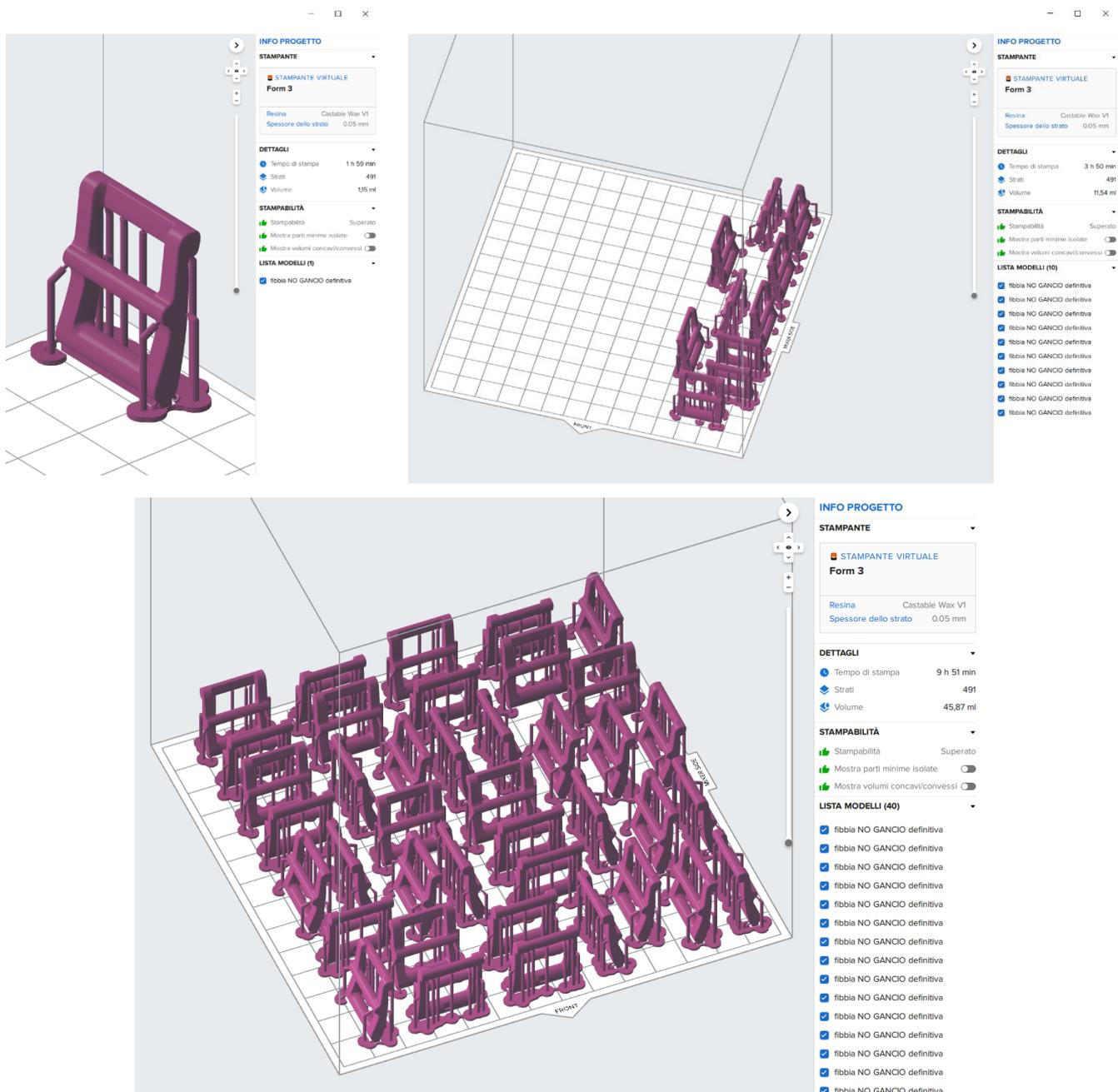


FIGURA 52: SIMULAZIONI DI STAMPA IN PREFORM - 1, 10 E 40 PEZZI



### 3.2. CONFRONTO SLA-INVESTMENT CASTING

Al fine di valutare la possibilità di applicare le tecniche di produzione additiva al processo di microfusione, viene effettuato il confronto tra i costi di produzione dei modelli in cera tramite SLA, che in virtù del confronto precedente risulta la tecnologia di AM più conveniente, e tramite stampaggio ad iniezione, metodo a cui si ricorre tradizionalmente nel processo di Investment Casting.

In questo caso i costi vengono calcolati al variare del volume di produzione e della taglia del lotto produttivo. Per i costi del processo di Investment Casting si considera anche la variabile aggiuntiva del numero di impronte (cavità) sullo stampo che si utilizza; all'aumentare del numero di cavità è possibile produrre per stampaggio ad iniezione più pezzi contemporaneamente (con riduzione dei costi di processo e quindi del total cost), ma aumenta la complessità realizzativa e di conseguenza i costi dello stampo (aumenta il tooling cost).

Nella tabella 25 vengono riportate le voci di costo di *tooling cost*, *total cost* (di processo) e *costo totale* unitari del processo di Investment Casting e il *costo totale* unitario della SLA:

Run	Volume produttivo	Lotto	INVESTMENT CASTING				SLA
			Impronte	Tooling	Total cost	Totale	Totale
1	80	1	1	1.940,78 €	158,51 €	182,77 €	87,68 €
2	80	10	1	1.940,78 €	16,52 €	40,78 €	41,64 €
3	80	40	1	1.940,78 €	4,68 €	28,94 €	35,63 €
4	160	1	1	1.940,78 €	158,51 €	170,64 €	75,48 €
5	160	10	1	1.940,78 €	16,52 €	28,65 €	31,27 €
6	160	40	1	1.940,78 €	4,68 €	16,81 €	26,54 €
7	200	1	1	1.940,78 €	158,51 €	168,22 €	73,03 €
8	200	10	1	1.940,78 €	16,52 €	26,22 €	29,16 €
9	200	10	5	2.237,91 €	15,93 €	27,12 €	"
10	200	10	10	2.609,31 €	15,86 €	28,90 €	"
11	200	40	1	1.940,78 €	4,68 €	14,39 €	24,68 €
12	200	40	10	2.609,31 €	4,02 €	17,07 €	"
13	400	1	1	1.940,78 €	158,51 €	163,36 €	68,13 €
14	400	10	1	1.940,78 €	16,52 €	21,37 €	24,91 €
15	400	40	1	1.940,78 €	4,68 €	9,54 €	20,90 €
16	400	40	10	2.609,31 €	4,02 €	10,55 €	"
17	400	80	1	1.940,78 €	2,71 €	7,56 €	20,35 €
18	400	80	10	2.609,31 €	2,05 €	8,58 €	"
19	1000	1	1	1.940,78 €	158,51 €	160,45 €	65,18 €
20	1000	10	1	1.940,78 €	16,52 €	18,46 €	22,34 €
21	1000	10	10	2.609,31 €	15,86 €	18,47 €	"
22	1000	40	1	1.940,78 €	4,68 €	6,62 €	18,61 €
23	1000	40	5	2.237,91 €	4,10 €	6,33 €	"
24	1000	40	10	2.609,31 €	4,02 €	6,63 €	"

TABELLA 25: CONFRONTO COSTI SLA - INVESTMENT CASTING

La prima osservazione che deriva dal calcolo dei costi di produzione dell'Investment Casting è che la produzione dei modelli è più economica se si utilizza uno stampo con un'unica impronta, infatti nel passaggio da 1 a 5 o 10 impronte, diminuiscono i costi di processo, ma meno di quanto aumentano i costi di realizzazione dello stampo.

Inoltre, si evidenzia che a parità di taglia del lotto produttivo, il costo del processo di Investment Casting tende a diminuire all'aumentare del volume di produzione, in quanto il costo per la realizzazione dello stampo, che rappresenta il contributo più alto, si ripartisce su un numero di pezzi prodotti maggiore.

Infine, dal confronto tra i due processi si evince che, a parità di volume di produzione, la SLA risulta più conveniente solo per bassi lotti produttivi, ovvero per la produzione rapida di poche unità di pezzi. Infatti, a partire da lotti di 10 pezzi a salire, la produzione dei modelli in cera tramite il metodo tradizionale di stampaggio ad iniezione ha un costo minore della produzione tramite tecniche di Additive Manufacturing.

## **4. ANALISI DELL'IMPATTO AMBIENTALE**

Nelle pagine che seguono è riportata una trattazione relativa ai sistemi e ai criteri standard da seguire per la realizzazione di una procedura di Life Cycle Assessment (LCA), metodo oggettivo di valutazione ambientale.

A seguire, tale procedura verrà applicata alla produzione additiva dell'accessorio di cui al cap.3, tramite SLA che, in virtù di quanto ottenuto dall'analisi dei costi, risulta essere la migliore alternativa per la prototipazione rapida impiegata nel processo di Investment Casting. L'obiettivo è quello di individuare quali sono i fattori della produzione a più alto impatto ambientale e suggerire dei possibili miglioramenti del processo al fine di ottimizzare la produzione rapida dei modelli in cera anche in termini ecologici.

### **4.1. METODO LCA**

Tra gli aspetti principali dello studio dei processi produttivi rivestono un ruolo importante la valutazione ambientale e l'analisi del ciclo di vita connessi ad un prodotto o un processo. L'obiettivo del progettista è quello di rendere determinati sistemi produttivi e determinate tecnologie sempre più *green*, sostenibili non solo dal punto di vista economico, ma anche dal punto di vista ambientale e sociale.

Il metodo del Life Cycle Assessment costituisce un metodo oggettivo e scientifico di valutazione ambientale utilizzato per quantificare tutte le implicazioni ambientali relative a prodotti, procedure o servizi.

L'idea di base della procedura LCA consiste nella registrazione di tutti i flussi di materiale e di energia legati al processo o servizio che si sta analizzando; vengono infatti considerati, non solo gli effetti ambientali a livello dell'impianto di produzione, ma l'intero ciclo di vita di un prodotto, a partire dall'approvvigionamento delle materie prime, fino allo smaltimento, passando attraverso l'utilizzo e il consumo. Ciò è fondamentale per evitare dei risultati incompleti e distorti, qualora si limitasse l'analisi ad un panorama troppo ristretto, e per spingere al massimo dell'ottimizzazione l'indagine.

Le implicazioni ambientali considerate prendono in esame tutti i tipi di impatto, dal consumo di risorse (input del processo come energia, materie prime, acqua) fino alle emissioni di sostanze dannose per l'uomo e l'ecosistema.

I primi sistemi di analisi del ciclo di vita risalgono agli anni '70 del secolo scorso, quando già molto importanti erano le tematiche relative a materie prime, richiesta di energia, problema delle emissioni

e smaltimento dei rifiuti; ma il vero significato di tali analisi cominciò ad essere colto solo a partire dagli anni '80.

Negli anni successivi, il progresso ha condotto alla stesura nel 1997 del primo protocollo dettagliato e riconosciuto per la procedura LCA <sup>[5]</sup>. Attualmente la norma di riferimento è la serie UNI (EN/ISO) 14040-14043. La norma fornisce un quadro generale delle pratiche, delle applicazioni e delle limitazioni del LCA e descrive attraverso una procedura step-by-step i requisiti per la sua preparazione, gestione e revisione critica.

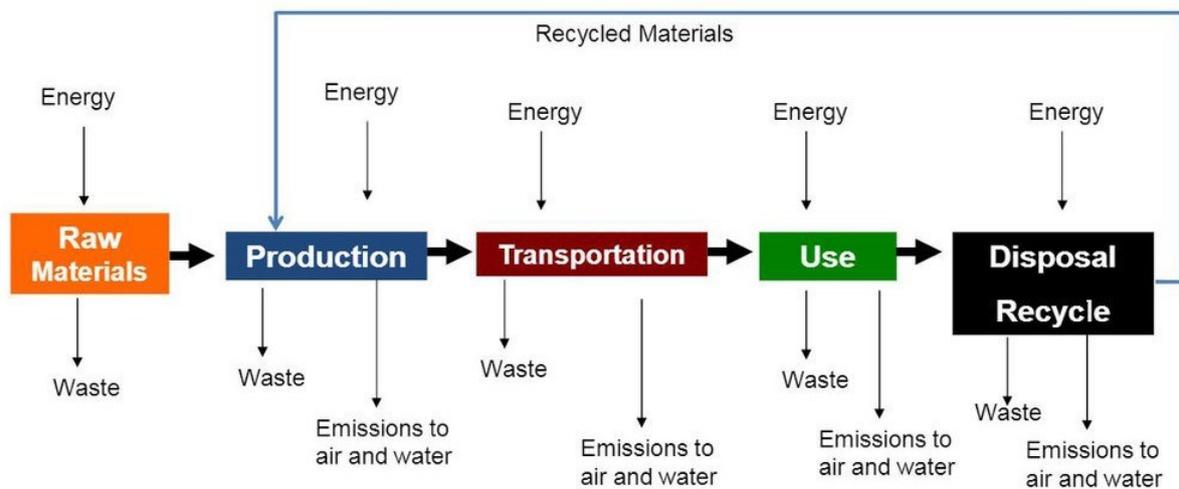


FIGURA 54: LCA - ESEMPIO FLUSSI DI MATERIALI ED ENERGIA

#### 4.1.1. FASI DELLA PROCEDURA

La struttura del metodo LCA, standardizzata dalla norma UNI (EN/ISO) 14040-14043, è costituita da 4 fasi:

- 1) **DEFINIZIONE OBIETTIVO E CAMPO DI APPLICAZIONE (Goal and Scope Definition)**
- 2) **REDAZIONE e ANALISI DELL'INVENTARIO (Life Cycle Inventory)** → compilazione di un inventario completo dei flussi in ingresso (materiali, energia, risorse naturali) e in uscita (emissioni, rifiuti);
- 3) **VALUTAZIONE DELL'IMPATTO AMBIENTALE (Life Cycle Impact Assessment)** → dovuto ai flussi in ingresso e in uscita;

4) **INTERPRETAZIONE e ANALISI DI MIGLIORAMENTO (Interpretation and Improvement Analysis)** → analisi dei risultati e definizione delle possibili linee di intervento.

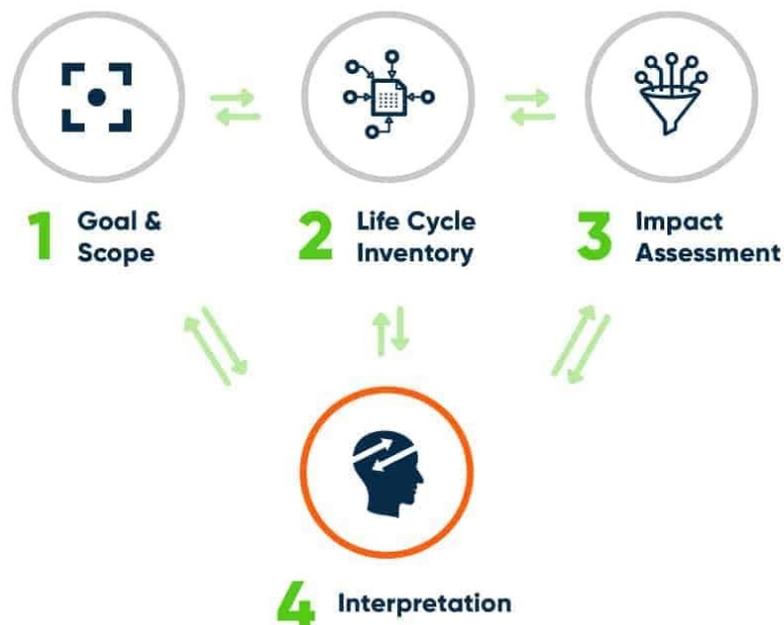


FIGURA 55: FASI DELLA PROCEDURA LCA

### DEFINIZIONE OBIETTIVO E CAMPO DI APPLICAZIONE

Primo passo della procedura LCA è la definizione dell'*unità funzionale*, ovvero di un prodotto o servizio che costituisce il riferimento a cui associare i flussi in entrata e in uscita, necessario per impostare l'analisi e consentire la comparabilità dei risultati che si otterranno, garantendo la possibilità di un confronto su base comune.

In questa prima fase vengono definiti il contesto dell'indagine, le richieste per le fasi successive, i fini dell'analisi condotta, i gruppi a cui è indirizzata l'indagine, ma anche il livello di dettaglio richiesto e l'affidabilità delle informazioni necessarie.

Fondamentale è quindi la definizione dei *confini del sistema* (system boundaries) in accordo con quelli che sono gli obiettivi del LCA. Innanzitutto, è necessario vagliare i mezzi utilizzabili, il contesto temporale e la disponibilità di tutti i dati necessari. Dapprima ci si concentra sul processo vero e proprio di manifattura, cercando di individuare i passi rilevanti e i flussi di materiale ed energia, nonché le emissioni nell'ambiente. In un secondo momento si estende l'analisi a monte e valle del processo manifatturiero considerando l'estrazione della materia prima, i sistemi di trasporto precedenti e successivi al ciclo produttivo, uso dei prodotti, riciclaggio e smaltimento. I confini del

sistema costituiscono quindi l'interfaccia con l'ambiente e definiscono quali procedure vadano incluse e quali escluse dall'indagine.

Nello stabilire l'estensione del bilancio dei flussi di materiali ed energia in ingresso e uscita emergono due problematiche:

- 1) **CRITERI LIMITE** → allo scopo di ridurre la complessità dell'indagine entro limiti ragionevoli, la portata del bilancio deve essere discussa, valutando la possibilità (o meno) che un flusso di materiale possa essere limitato
  - **CRITERIO DI MASSA**: solo nel caso in cui il bilancio di massa del flusso di un materiale cada al di sotto di una certa soglia minima (stabilita a priori) sia in entrata, che in uscita rispetto al sistema, allora è possibile trascurare gli aspetti relativi alla produzione di tale materiale
  - **CRITERIO ENERGETICO**: in maniera analoga, gli aspetti relativi ad un certo materiale possono essere trascurati solo qualora il suo contributo all'energia totale (ottenuta sommando le quote di tutti i materiali) cada al di sotto di una certa soglia (stabilita a priori)
- 2) **PROCEDURA DI ALLOCAZIONE** → se si presentano produzioni accoppiate (ovvero prodotti coinvolti in più fasi dell'analisi e procedure che generano prodotti secondari), i flussi di materiali ed energia devono essere allocati a ciascun prodotto secondo procedure definite.

## **ANALISI DELL'INVENTARIO**

L'analisi dell'inventario consiste nella descrizione quantitativa di tutti i flussi di materiali ed energia legati all'intera vita del prodotto in esame, determinati sulla base delle entrate (materiali, trasporti, energia) e uscite (emissioni nell'aria, nell'acqua e nel suolo) di ciascun processo parziale, in relazione ai confini del sistema. Tutti i dati relativi ai flussi di materiali ed energia che passano i confini del sistema vengono annotati quantitativamente (tramite unità di misura tradizionali), facendo sempre riferimento all'unità funzionale.

Tali dati raccolti possono essere: dati primari, ovvero provenienti da rilevamenti diretti; dati secondari, ricavati dalla letteratura; dati terziari, provenienti da stime e valori medi.

In questa fase si fa spesso uso di software dedicati come GaBi, Simapro e Team, che consentono la modellazione del sistema utilizzato.

## **VALUTAZIONE DELL'IMPATTO AMBIENTALE**

Valutazione qualitativa e quantitativa che permette di definire gli effetti ambientali dei flussi di materiali e di energia definiti e calcolati durante l'analisi dell'inventario, evidenziando i processi e le

fasi del ciclo di vita di un determinato prodotto maggiormente critiche, i materiali e i flussi elementari responsabili di tali effetti.

In questa analisi sono 4 le fasi principali:

- 1) **INDIVIDUAZIONE DELLE CATEGORIE DI IMPATTO** → categorie ambientali a cui possono essere associati i potenziali effetti sull'uomo e sull'ambiente risultanti dall'inventario. Alcuni esempi sono: riscaldamento globale (GWP); riduzione dell'ozono presente nella stratosfera (ODP); acidificazione (AP); tossicità per l'uomo (HTP); eco-tossicità (ETP); utilizzo del territorio [6];
- 2) **CLASSIFICAZIONE** → i dati dell'inventario vengono assegnati ad una o più categorie di impatto;
- 3) **CARATTERIZZAZIONE** → i risultati dell'inventario, associati ad una categoria di impatto, sono ricondotti con opportuni fattori di conversione ad una comune unità di misura e sono aggregati in modo da definire un indicatore numerico di impatto della categoria. Il fattore di caratterizzazione misura l'intensità dell'effetto ambientale di quel determinato prodotto o processo;
- 4) **NORMALIZZAZIONE** → i risultati ottenuti dall'operazione di caratterizzazione vengono normalizzati, ovvero i valori ottenuti per ciascuna categoria di impatto vengono divisi per un termine di riferimento, al fine di ottenere degli indici sintetici con cui valutare complessivamente il sistema in esame.

Tale processo di valutazione viene condotto mediante l'ausilio di software, come Simapro, in cui sono selezionabili dei metodi di valutazione (ReCiPe MidPoint; vedi paragrafo 4.2.2.) capaci di effettuare l'analisi in pochi passaggi e di fornire gli indici di valutazione dell'impatto.

## **INTERPRETAZIONE**

Fase di interpretazione e analisi dei risultati ottenuti, spiegazione del significato che essi assumono e delle restrizioni che pongono, nonché di valutazione delle opzioni di intervento per ridurre gli impatti e i carichi ambientali dell'unità funzionale in studio. Un intervento mirato consente, ove possibile, un miglioramento in termini di minor richiesta di energia, minori emissioni, minor uso di risorse ecc. ed è volto all'ottimizzazione ecologica del prodotto o processo in questione.

## 4.2. LIFE CYCLE ASSESSMENT – SLA

L'applicazione del metodo LCA al processo di Stereolitografia ha come obiettivo l'ottimizzazione della produzione rapida dei modelli in cera, non soltanto dal punto di vista economico, ma anche dal punto di vista ecologico, arrivando alla definizione dei parametri del processo più impattanti e al suggerimento di possibili linee di intervento per ridurre gli effetti ambientali.

L'analisi è stata condotta sulla falsariga di una procedura di LCA riportata nella pubblicazione “*Life cycle impact assessment of desktop stereolithography*”; Mattia Mele, Giampaolo Campana, Giulia D'Avino; 2019. Nell'articolo viene presentata un'analisi LCA del processo globale di Stereolitografia dalla produzione della resina, fino alla consegna del componente finito. Dall'articolo, oltre ad alcune assunzioni e ipotesi fondamentali per la conduzione della procedura LCA, sono stati estrapolati i parametri necessari per valutare gli impatti ambientali di ciascun componente del processo di SLA e per riferirli all'unità funzionale.

Si è assunta come *unità funzionale* la singola parte prodotta con il processo di SLA, ovvero nel caso specifico la fibbia per cinture di cui al cap.3. Ogni unità funzionale è rappresentata da un vettore  $P = [M_p; M_s; t_b]$  dove  $M_p$ ,  $M_s$  e  $t_b$  sono rispettivamente la massa del prodotto, la massa dei supporti usati per la costruzione del pezzo e il tempo di build. Queste tre componenti rappresentano le variabili indipendenti da cui dipendono, in base a degli specifici parametri e coefficienti percentuali (vedi paragrafo 4.2.1.), i fattori di allocazione degli impatti di ciascun componente impiegato nel processo di stampa.

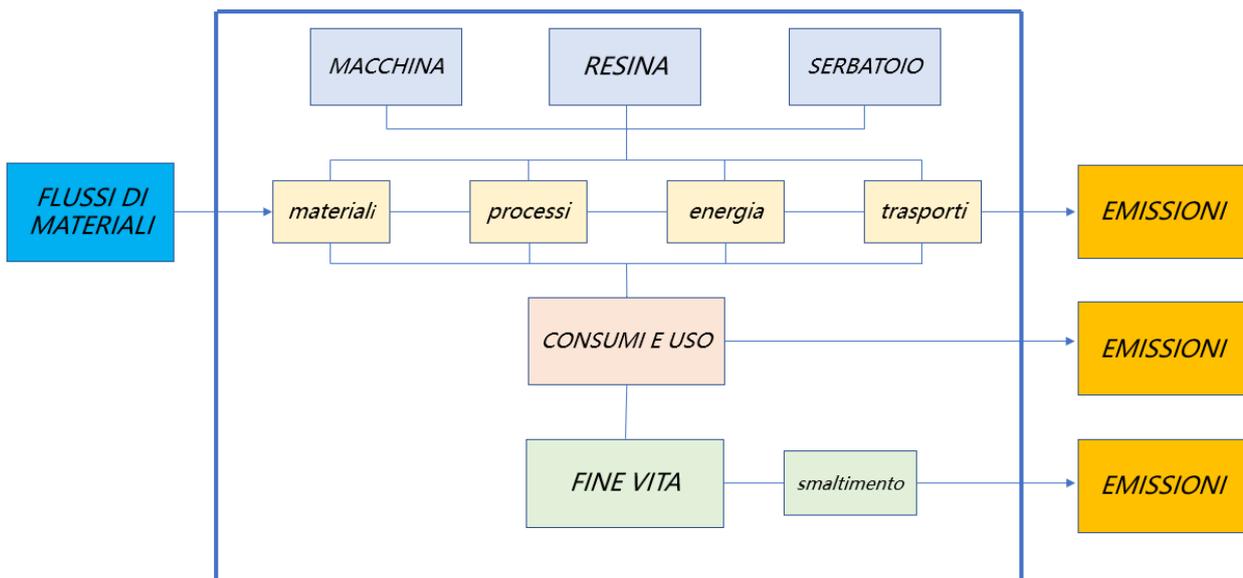


FIGURA 56: CONFINI DEL SISTEMA

In virtù dei risultati ottenuti nell'analisi LCA riportata nell'articolo, si è scelto di condurre l'analisi considerando solo i tre componenti fondamentali del processo di SLA:

- 1) MACCHINA: Formlab Form3
- 2) RESINA: Castable Wax
- 3) SERBATOIO DI STAMPA dove avviene il processo di stampa.

Sono stati esclusi gli impatti dell'alcol isopropilico (IPA), della vasca per la pulizia post-produzione, dei guanti indossati dall'operatore, della rimozione dei supporti, aventi (stando ai risultati dell'articolo) un impatto trascurabile rispetto al totale.

Il sistema considerato e i suoi confini sono riportati in Fig.56.

### 4.2.1. MODELLAZIONE INVENTARIO

La redazione dell'inventario è stata effettuata direttamente nel software Simapro, in cui è stato necessario inserire e modellare da zero i dati, dal momento che nel software non è presente un processo di SLA selezionabile. I dati sono stati ricavati dall'articolo e implementati con quelli provenienti dal database Ecoinvent 3.5, presente nel software.

La Fig.57 riporta la struttura dell'inventario:

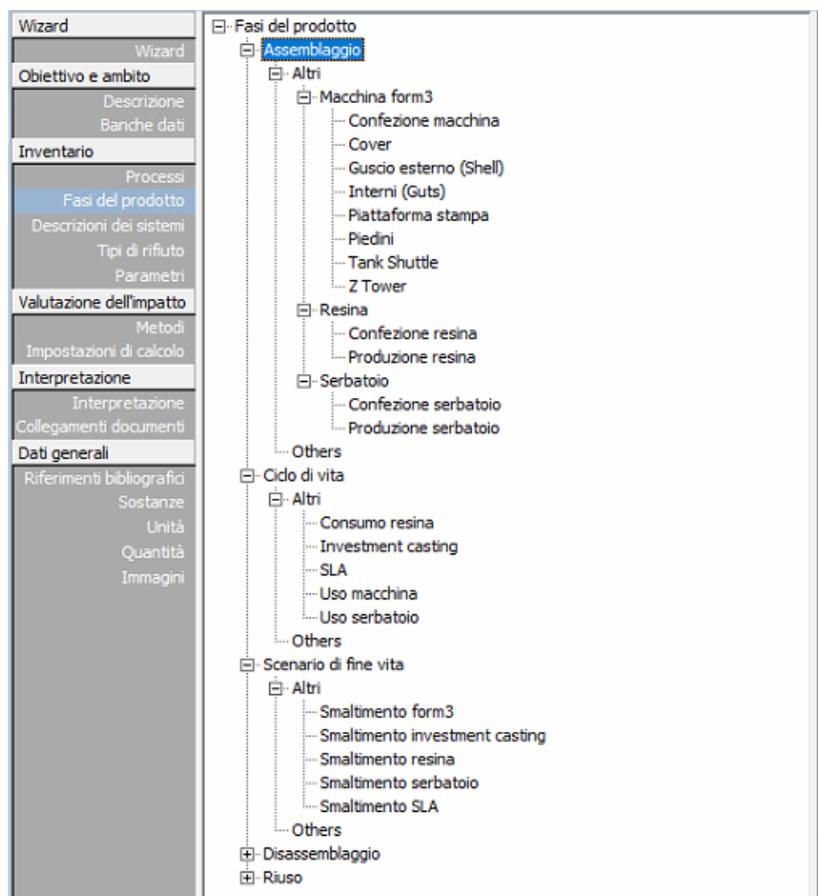


FIGURA 57: STRUTTURA INVENTARIO - SIMAPRO

## ASSEMBLAGGIO

Nel gruppo “Assemblaggio” sono stati posti i tre sottogruppi detti sopra (macchina, resina, serbatoio), per ciascuno sono stati inseriti i dati relativi ai materiali, ai processi di produzione e di lavorazione, al confezionamento e ai trasporti associati a ciascun componente considerato.

### ▪ MACCHINA FORM3

Gli impatti ambientali connessi alla stampante Form3 riguardano le fasi di produzione, imballaggio, trasporto e smaltimento di tutti i componenti di cui è costituita la macchina e sono valutati mediante un fattore di allocazione  $\alpha_{SLA}$ , legato al tempo di stampa ( $t_b$ ) e al tempo di vita utile della stampante ( $T_{span}$ , fissato a 4000h).

$$\alpha_{SLA} = t_b / T_{span}$$

Le assunzioni per i trasporti della macchina sono le stesse riportate nell’articolo sopra citato: la stampante viene prodotta nella sede della casa costruttrice Formlabs a Somerville, Massachusetts (USA); poi viene spedita per via aerea dagli Stati Uniti a Rotterdam, Olanda, dove è situato il magazzino per il mercato europeo; infine tramite uno spostamento con camion raggiunge Bologna, dove ha sede l’azienda che realizza il processo di SLA (nel caso specifico è stata considerata la sede di Energy Group, vedi introduzione).

Di seguito sono riportati i componenti della macchina considerati e per ciascuno di essi sono elencati i termini che contribuiscono all’impatto ambientale di quel componente. L’impatto di ogni termine è quantificato come un valore percentuale del fattore di allocazione  $\alpha_{SLA}$ , tali valori percentuali sono stati ricavati dall’articolo sopracitato e inseriti direttamente nel software. Lo stesso vale anche per i termini elencati in seguito relativi a RESINA e SERBATOIO, per i quali saranno definiti i relativi fattori di allocazione.

- CONFEZIONE MACCHINA
  - Produzione e trasformazione cartone esterno
  - Dismissione cartone esterno
  - Produzione polistirene
  - Trasformazione polistirene
  - Dismissione polistirene
- COVER (COPERCHIO)
  - Produzione alluminio
  - Produzione policarbonato
  - Lavorazione alluminio
  - Iniezione plastica

- Dismissione alluminio
- Dismissione policarbonato
- GUSCIO ESTERNO
- Produzione alluminio
- Produzione vetro
- Produzione policarbonato
- Lavorazione alluminio
- Costruzione circuiti (comprende materiale)
- Iniezione plastica
- Dismissione alluminio
- Dismissione policarbonato
- Dismissione circuiti
- INTERNI
- Produzione alluminio
- Produzione vetro
- Produzione rame
- Produzione policarbonato
- Lavorazione alluminio
- Costruzione circuiti (comprende materiale)
- Costruzione power supply (include materiale)
- Costruzione cavi (include materiale)
- Iniezione plastica
- Dismissione alluminio
- Dismissione policarbonato
- Dismissione circuiti
- Dismissione cavi
- PIATTAFORMA DI STAMPA
- Produzione alluminio
- Lavorazione alluminio
- Dismissione alluminio
- PIEDINI
- Produzione alluminio
- Lavorazione alluminio
- Dismissione alluminio

- TANK SHUTTLE (serbatoio materiale)
  - Produzione alluminio
  - Produzione policarbonato
  - Lavorazione alluminio
  - Iniezione plastica
  - Costruzione circuiti (comprende materiale)
  - Dismissione alluminio
  - Dismissione policarbonato
  - Dismissione circuiti
- Z TOWER
  - Produzione policarbonato
  - Produzione alluminio
  - Lavorazione alluminio
  - Costruzione circuiti (comprende materiale)
  - Iniezione plastica
  - Dismissione alluminio
  - Dismissione circuiti
- TRASPORTI
- RESINA
 

Fattore di allocazione considerato è la massa totale della resina  $M_{tot}$

  - CONFEZIONE RESINA
    - Produzione plastica HPDE (materiale grezzo)
    - Trasformazione plastica HPDE (confezione)
    - Dismissione confezione in plastica resina
    - Produzione e trasformazione cartone esterno
    - Dismissione cartone esterno
  - PRODUZIONE RESINA
 

La Castable wax è costituita dalle tre sostanze seguenti in percentuale rispettivamente di 78,5%, 20%, 1,5%.

    - Produzione methacrylated oligomers
    - Produzione wax
    - Produzione diphenyl phosphine oxide
- TRASPORTI (stesse assunzioni fatte per i trasporti della macchina)

- **SERBATOIO**

Fattore di allocazione considerato è  $\alpha_T$ , legato alla massa totale della resina, al volume del serbatoio  $V_{span}$  e alla densità della resina:

$$\alpha_T = M_{tot} / (V_{span} \times \rho_{resin})$$

- **CONFEZIONE SERBATOIO**
  - Produzione e trasformazione cartone esterno
  - Dismissione cartone esterno
- **PRODUZIONE SERBATOIO**
  - Produzione policarbonato
  - Produzione silicone (compreso materiale)
  - Iniezione plastica
  - Dismissione policarbonato e silicone
- **TRASPORTI** (stesse assunzioni fatte per i trasporti della macchina)

#### CICLO DI VITA

Nel gruppo “Ciclo di vita” vengono quantificati i consumi e gli usi di macchina, resina e serbatoio, compresi i consumi di energia.

#### SCENARIO DI FINE VITA

Nel gruppo “Scenario di fine vita” vengono inserite e quantificate le modalità di smaltimento di macchina, resina e serbatoio.

Nome	Unità di mi /	Progetto	Stato
Scenario investment casting	kg	nicolò rocchetti	Nessuno
Smaltimento form3	kg	nicolò rocchetti	Nessuno
Smaltimento resina	kg	nicolò rocchetti	Nessuno
Smaltimento serbatoio	kg	nicolò rocchetti	Nessuno
Smaltimento SLA	kg	nicolò rocchetti	Nessuno

**TABELLA 26: SCENARI DI SMALTIMENTO**

### 4.2.2. VALUTAZIONE DELL'IMPATTO AMBIENTALE

Una volta definito e completato l’inventario, il software procede all’analisi dell’impatto ambientale che ne deriva. In questa fase l’unica impostazione da selezionare è il metodo di calcolo secondo il quale il software fornisce gli indicatori di impatto ambientale riferiti alle diverse categorie che il metodo selezionato prevede.

In particolare il metodo scelto è ReCiPe MidPoint (H)V1.12, che prevede le seguenti categorie di impatto: climate change, ozone depletion, terrestrial acidification, freshwater eutrophication, marine

eutrophication, human toxicity, photochemical oxidant formation, particulate matter formation, terrestrial ecotoxicity, freshwater ecotoxicity, marine ecotoxicity, ionising radiation, agricultural land occupation, urban land occupation, natural land transformation, water depletion, metal depletion, fossil depletion.

In Fig. 58 e in Fig. 59 viene riportato il risultato dell'analisi, in particolare le figure mostrano come i valori ottenuti degli impatti ambientali per ciascuna categoria si ripartiscono tra i tre gruppi di:

- 1) STAMPA 3D (in blu): corrisponde al gruppo "Assemblaggio" dell'inventario, ovvero ai componenti di macchina, resina e serbatoio rappresentanti il processo di Stereolitografia;
- 2) ELECTRICITY (in giallo): corrisponde all'impatto ambientale del consumo di energia elettrica riportato del gruppo "Ciclo di vita" dell'inventario;
- 3) SMALTIMENTO (in rosso): corrisponde all'impatto degli scenari di fine vita, ovvero degli smaltimenti di macchina, resina, serbatoio e tutti i loro componenti.

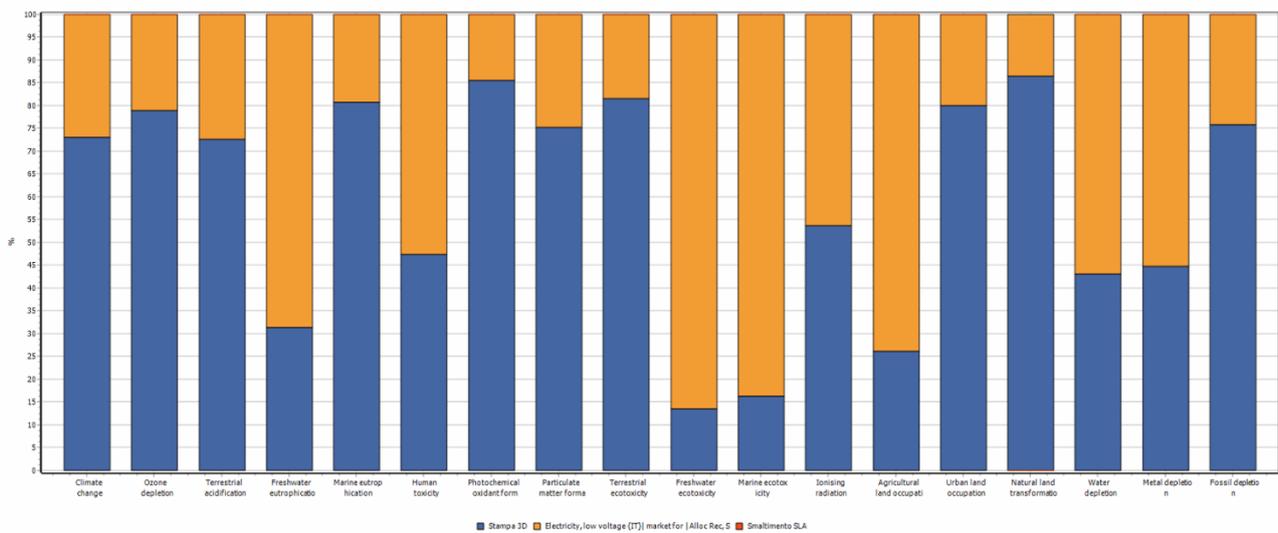


FIGURA 59: VALUTAZIONE DELL'IMPATTO - SIMAPRO

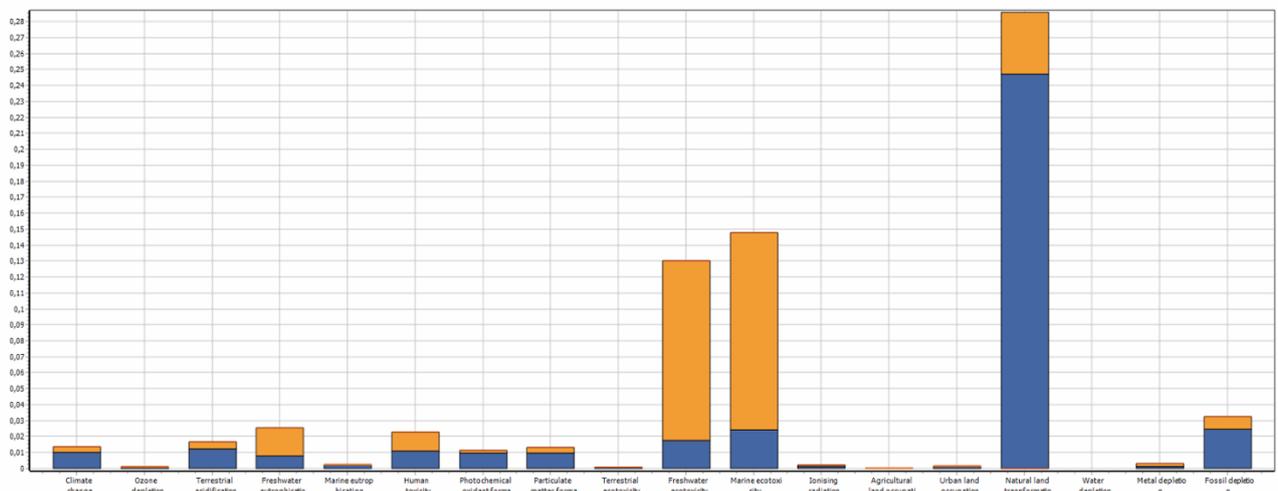


FIGURA 58: VALUTAZIONE DELL'IMPATTO NORMALIZZATA - SIMAPRO

Il primo risultato che si ottiene è la definizione della categoria ambientale su cui il processo di SLA ha il maggior impatto → “*NATURAL LAND TRASFORMATION*”, “*trasformazione del suolo naturale*”.

Dalle due figure precedenti è possibile intuire la diversa entità dei contributi all’impatto ambientale complessivo, di ciascuno dei tre gruppi sopra detti (stampa 3D, electricity e smaltimento). A questo proposito fondamentale è la stesura del grafico ad albero riportato in Fig.60.

Il primo livello della Fig.60 mostra proprio qual è il contributo di ciascun gruppo all’impatto totale. Si nota come il processo di stampa 3D vero e proprio costituisca il termine più impattante, con il 74,4% dell’impatto complessivo, segue il consumo di energia elettrica con il 25,6%, mentre l’impatto dei processi di smaltimento è esiguo, inferiore all’1%.

Le frecce tracciate hanno spessore proporzionale all’intensità del contributo all’impatto ambientale.

Nel secondo livello si osserva come nel gruppo di stampa 3D il termine più impattante sia dato dalla macchina (stampante Form3), infatti del 74,4% di cui sopra, il 66,4% è dovuto agli effetti ambientali della stampante, ovvero ai trasporti, ai processi di produzione e lavorazione, ai materiali e al confezionamento di tutti i componenti della macchina riportati nell’inventario. Molto più contenuti sono invece i contributi della resina e del serbatoio, rispettivamente il 4,35% e il 3,6%.

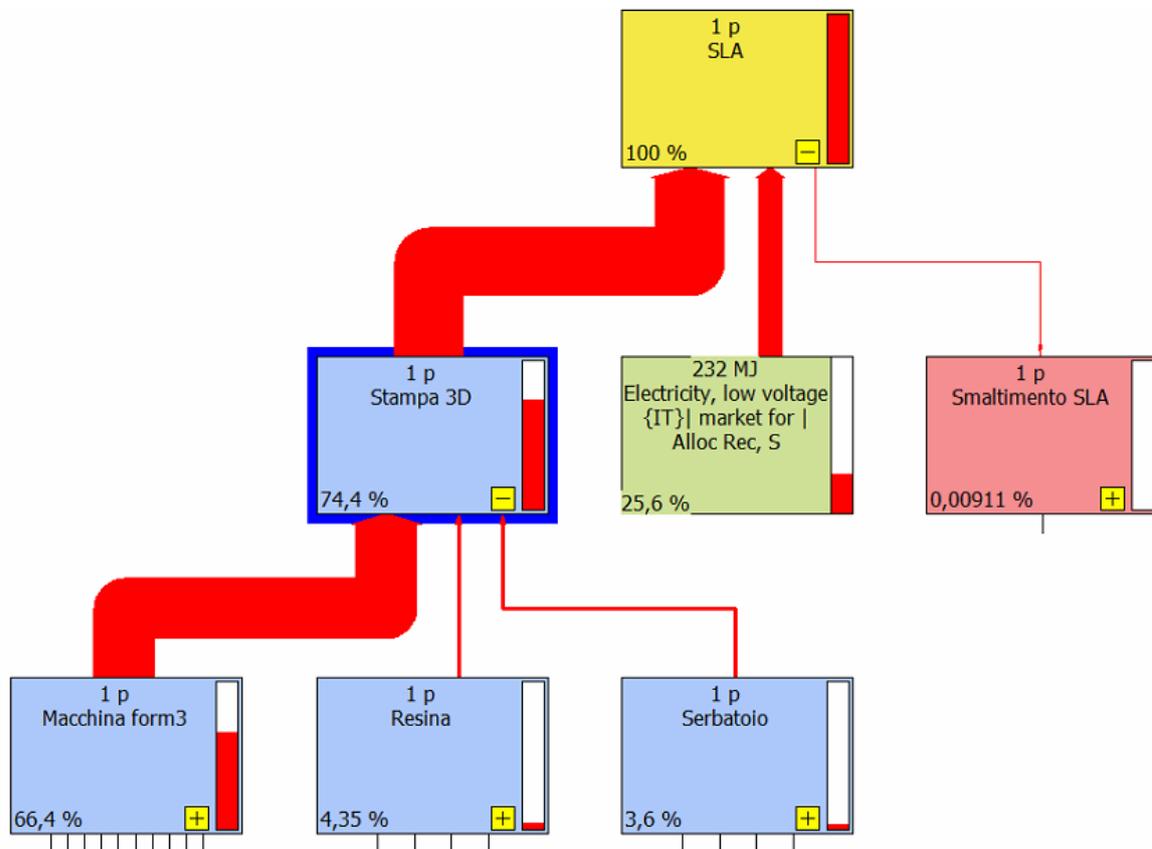


FIGURA 60: GRAFICO AD ALBERO DELL'IMPATTO - SIMAPRO

Ancora più nel dettaglio è possibile valutare quali sono gli apporti dei vari componenti della stampante Form3 (trasporti, confezione, coperchio, guscio esterno, interni, piattaforma di stampa, piedini, serbatoio materiale, z tower) maggiormente responsabili dell'impatto ambientale della macchina, così nettamente superiore a quelli di resina e serbatoio.

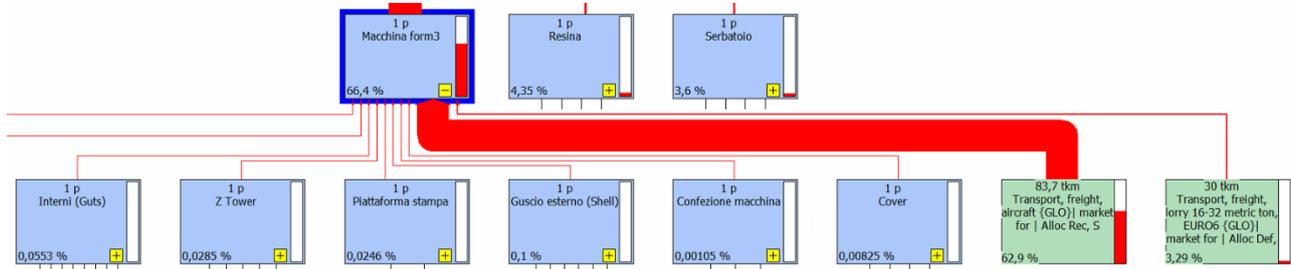


FIGURA 61: GRAFICO AD ALBERO IMPATTI MACCHINA FORM3 - SIMAPRO

Dalla Fig.61 emerge nettamente che l'impatto della stampante Form3 è legato quasi esclusivamente ai trasporti, per un totale di 66,19% sulla percentuale di impatto ambientale complessivo della macchina del 66,4%, e in particolare al trasporto aereo (62,9%)

Per completezza di informazione si riportano anche i contributi delle fasi di confezionamento e di produzione e dei trasporti agli impatti ambientali di resina e serbatoio di stampa, seppur i loro valori siano una percentuale trascurabile dell'impatto ambientale complessivo.

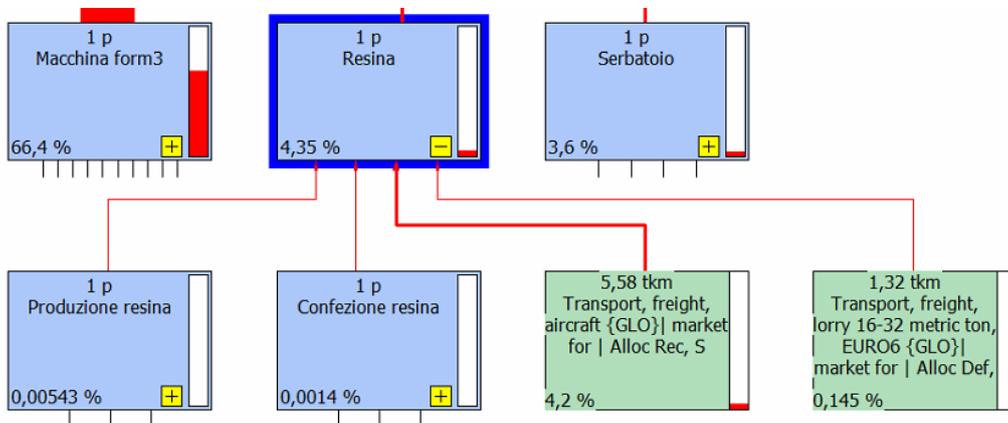


FIGURA 62: GRAFICO AD ALBERO IMPATTI RESINA - SIMAPRO

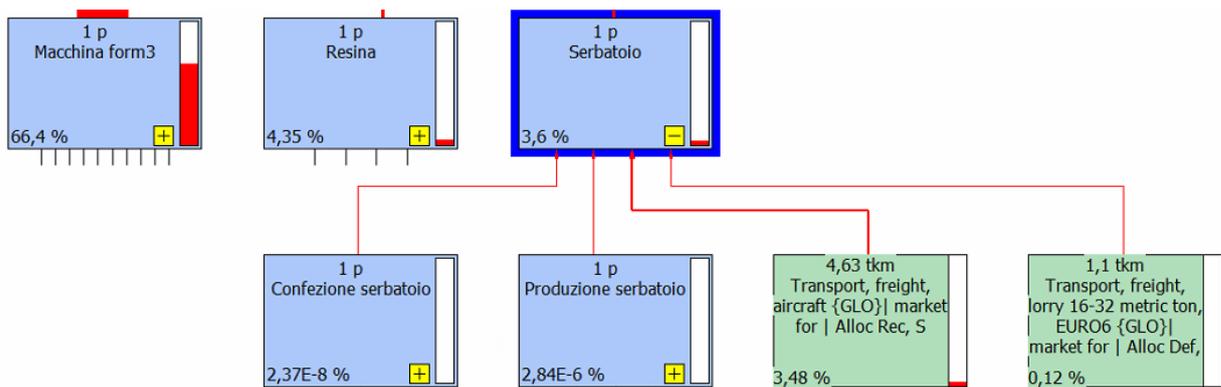


FIGURA 63: GRAFICO AD ALBERO IMPATTI SERBATOIO - SIMAPRO

### 4.2.3. RISULTATI FINALI e ANALISI DI MIGLIORAMENTO

I risultati della procedura di Life Cycle Assessment condotta evidenziano come i termini responsabili degli effetti ambientali del processo di Stereolitografia siano il trasporto della stampante dal luogo di produzione a quello di utilizzo e il consumo di energia elettrica, aventi contributi rispettivamente del 66,19% e del 25,6% dell'impatto complessivo del processo di SLA.

Per quanto riguarda i trasporti, è un risultato che non deve lasciare sorpresi in quanto l'analisi è stata condotta sulla base dell'assunzione che la stampante, utilizzata a Bologna, venga prodotta negli Stati Uniti e, passando per l'Olanda, subisca un trasferimento di circa 7000km.

In secondo luogo, l'elevato impatto dei trasporti è giustificato dal fatto che nella redazione dell'inventario, in particolare in fase di calcolo del fattore di allocazione  $\alpha_{SLA}$ , si è assunto un periodo di utilizzo della macchina piuttosto breve, di 4000h di impiego, corrispondenti circa ai 3 anni di ammortamento previsti. È accettabile dunque che l'impatto dei trasporti sia elevato, essendo essi relativi ad un periodo di tempo contenuto.

L'elevato impatto dei trasporti si ricollega al fatto che tra le categorie ambientali, la più interessata dagli effetti del processo di SLA sia quella di "natural land transformation", essendo la trasformazione del suolo naturale una questione fortemente legata all'inquinamento atmosferico.

Per concludere, al fine di ottimizzare dal punto di vista ecologico ed ambientale la tecnologia di SLA, non potendo intervenire sugli inevitabili consumi di energia, una possibile linea di intervento potrebbe essere quella di rivedere la logistica del processo, cercando di minimizzare la distanza e quindi i trasporti necessari, tra il luogo di produzione e quello di utilizzo della macchina.

## CONCLUSIONI

Nel presente elaborato è stata analizzata la possibilità di applicare le tecnologie di produzione additiva al processo di microfusione a cera persa, al fine di ottimizzare dal punto di vista tecnico-economico e ambientale la fabbricazione dei modelli in cera impiegati nel processo di Investment Casting.

Per quanto riguarda l'ottimizzazione economica, mediante un modello di calcolo precedentemente sviluppato per il processo di Investment Casting e la stesura di due modelli di calcolo per i processi additivi di SLA e MJP, si è proceduto ad un confronto in termini di costi e tempi di produzione.

In primo luogo, il confronto tra le due tecnologie di Additive Manufacturing ha evidenziato come ai fini della produzione rapida dei modelli in cera, la SLA risulti la tecnica produttiva più economica, nonostante richieda dei tempi decisamente più lunghi rispetto alla MJP. Infatti, considerando volumi di produzione contenuti, coerenti con quelli delle aziende che si occupano di prototipazione rapida, ovvero non superiori al volume di produzione di 1000 pezzi a cui è stato effettuato il confronto, con la Stereolitografia vengono sostenuti costi minori e si riesce a far fronte alla produzione annua richiesta, seppur in tempi maggiori rispetto alla MultiJet Printing.

In un secondo momento il confronto è stato effettuato tra la tecnica di Additive Manufacturing più conveniente (SLA) e lo stampaggio ad iniezione, metodo con cui vengono tradizionalmente realizzati i modelli in cera nel processo di Investment Casting. Da tale confronto è emerso che la produzione rapida dei modelli in cera mediante tecniche di fabbricazione additiva risulta vantaggiosa solo per lotti produttivi contenuti, di meno di 10 unità, qualsiasi sia l'entità del volume di produzione.

Tale risultato non lascia sorpresi, in quanto già anticipato dalle aziende a cui si è fatto riferimento per il reperimento di informazioni nella fase iniziale di ricerca (Energy Group e Microfound, vedi Introduzione), che ricorrono ai processi di stampa 3D per la prototipazione di poche unità di pezzi.

Ai fini dell'ottimizzazione ambientale, è stata condotta una procedura di Life Cycle Assessment del processo di SLA, per valutare gli effetti ambientali connessi alla produzione additiva dei modelli in cera. In base alle assunzioni effettuate, è emerso che il termine più impattante dell'intero processo risulta essere la macchina di stampa e in particolare i trasporti necessari per il trasferimento per via aerea e stradale della stampante dal sito di produzione (USA) al luogo di utilizzo (Bologna).

A partire dai risultati a cui si è pervenuti, un possibile sviluppo futuro dell'analisi potrebbe essere la valutazione dell'impatto ambientale dello stampaggio ad iniezione, tramite apposita procedura LCA, per valutare gli effetti ambientali connessi e confrontarli con quelli relativi alle tecniche di produzione additiva.

## NOTE

[1] Pattnaik S., Benny Karunakar D., Jha P.K., 2012, “Developments in investment casting process—A review”, in sciencedirect.com; <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.06.003>

[2] Forcellese A., dispense dal corso di “Tecnologia Meccanica” A.A. 2019-2020, in learn.univpm.it

[3] Mora M., tesi di laurea “Progettazione di componenti in metallo da realizzare per Additive Manufacturing”, A.A. 2017-2018

[4] Morazzini F., tesi di laurea “Modello di costo analitico a supporto della progettazione di componenti ottenuti per microfusione”, A.A. 2018-2019

[5] ISO/EN/DIN 14040. (1997). Umweltmanagement, Ökobilanz, Prinzipien und allgemeine Anforderungen.)

[6] Università degli studi di Trento, 2014, Linee guida ARCA per la Life Cycle Assessment (LCA)

## **BIBLIOGRAFIA**

Benny Karunakar D., Jha P.K., Pattnaik S., 2012, “Developments in investment casting process—A review”, in sciencedirect.com; <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.06.003>

Bian L., Dunaway D., Jaradat R., Harstvedt J.D., 2018, Ma J., “An exploratory investigation of Additively Manufactured Product life cycle sustainability assessment”, in sciencedirect.com; <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.249>

Campana G., D’Avino G., Mele M., 2020, “Life cycle impact assessment of desktop stereolithography”, in sciencedirect.com; <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118743>

Diegel O., Motte D., Nordin A., “A practical guide to design Additive Manufacturing”, Springer Nature Singapore, 2020

Lynch P.C., Manogharan G., Reddy Sama S., Wang J., 2019, “Design and Topology Optimization of 3D-Printed Wax Patterns for Rapid Investment Casting”, in sciencedirect.com; <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.224>

## **SITOGRAFIA**

Formlabs, <https://formlabs.com/it/>

3DSYSTEMS, <https://uk.3dsystems.com/>

ScienceDirect.com, <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.cad.univpm.it/>

Investment Castings, <https://www.investment-castings.net/>

## **RINGRAZIAMENTI**

I miei ringraziamenti vanno innanzitutto al prof. Michele Germani per avermi dato la possibilità di intraprendere questo percorso di tirocinio; all' Ing. Marco Mandolini, per avermi guidato nell'analisi e nella stesura dell'elaborato, ai suoi collaboratori Federica Santucci e Federico Campi per avermi seguito da vicino durante tutto il tirocinio, fornendomi il materiale, il supporto e le conoscenze necessarie per lo sviluppo del lavoro e della tesi.

Vorrei poi ringraziare le aziende e tutti coloro che ci hanno fornito materiali e informazioni preziose necessarie alla stesura e al perfezionamento dei modelli sviluppati nella tesi, in particolare Santoni Srl, per i modelli della fibbia; Energy Group, Microfound e il Dott. Alessandro Ricci dell'azienda 3DIFIC.

Infine, ringrazio parenti, amici e tutti coloro che mi hanno supportato e continueranno a supportarmi nel mio percorso di studi.