Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale
A.a. 2022/2023
Sessione di Laurea Marzo 2023

ANALISI DI COSTO DI UN U-LOCK PER BICI REALIZZATO IN ADDITIVE MANUFACTURING

Relatore:
Prof. Caviggioli Federico

Correlatori:
Prof.ssa Calignano Flaviana
Prof.ssa Galati Manuela

Candidato:
Mancarella Andrea

INDICE

1. INTRODUZIONE 7

2. CARATTERISTICHE DEL PRODOTTO E OBIETTIVI DELLA TESI 8

3. ANALISI DEI COSTI 10

3.1 TECNICHE PRODUTTIVE E MODELLI DI COSTO PRESENTI IN LETTERATURA 11

3.1.1 DESCRIZIONE DEI PROCESSI AM 11

3.1.2 PRINCIPALI MODELLI DI COSTO DELLA PRODUZIONE ADDITIVA 23

3.2 SCELTA DEL MACCHINARIO IN OGNI SCENARIO E RELATIVA COSTIFICAZIONE 33

3.2.1 SCENARIO 1: PROCESSO PBF-EB/M CON STAMPANTE ARCAM A2X 35

3.2.2 SCENARIO 2: PROCESSO PBF-LB/M CON STAMPANTE M290 41

4. ANALISI DEL MERCATO DI LUCCHETTI PER BICI E INDIVIDUAZIONE DEL BREAK-EVEN-POINT 47

5. CONFRONTO TRA PROCESSI (PBF-EB VS PBF-LB) E CONCLUSIONE 59

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA 62

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1. Esempio della struttura reticolare con inserti [1] 8
Figura 2. Tecnologie di AM per la produzione di componenti metallici [2], [4], [5]. 11
Figura 3. Schema rappresentativo di un sistema PBF-LB [10] 14
Figura 4. Esempio di un macchinario per pallinatura [11] 15
Figura 5. Schema rappresentativo di un processo EBM [18] 20
Figura 6. Confronto tra processo AM e tradizionale [21] 23
Figura 7. Andamento del costo del processo AM [21] 25
Figura 8. Architettura del software [12] 29
Figura 9. Report per la selezione del miglior angolo di orientamento della parte [23] 30
Figura 10. Schema del processo completo di realizzazione prodotto [24] 31
Figura 11. Cad del nuovo lucchetto ad U (struttura piena) 33
Figura 12. Scheda tecnica Arcam A2X 35
Figura 13. Disposizione lucchetti in Arcam A2x (vista frontale) 36
Figura 14. Disposizione lucchetti in Arcam A2X (vista dall'alto) 36
Figura 15. Scheda tecnica EOS M290 41
Figura 16. Disposizione lucchetti in M290 (vista di profilo) 42
Figura 17. Disposizione lucchetti in M290 (vista dall'alto) 42
Figura 18. Cavo in acciaio 46
Figura 19. Catenaccio 46
Figura 20. Catenaccio a maglie quadre 48
Figura 21. U-lock 46
Figura 22. Snake 46
Figura 23. Blocca disco 48
Figura 24. Lucchetto Nutfix [26] 49
Figura 25. Valore di Break even per processo EBM 53
Figura 26. Andamento utile di esercizio per il processo PBF-EB/M 56
Figura 27. Valore di Break even per processo LPBF 57
Figura 28. Andamento utile di esercizio per il processo PBF-LB/M 58
Figura 29. Confronto utile di esercizio (processo PBF-LB/M vs PBF-EB/M) 60

INDICE DELLE TABELLE

Table 1. Classificazione dei materiali utilizzati nell'additive manufacturing [2] 9
Table 2. Dati tecnici stampante EOS M290 [13] 16
Table 3. Dati tecnici stampante EOS M300 [13] 16
Table 4. Dati tecnici stampante EOS M400 [13] 17
Table 5. Dati tecnici stampante M2 [14] 17
Table 6. Dati tecnici stampante X LINE 2000 [14] 17
Table 7. Dati tecnici stampante SLM 125 [15] 18
Table 8. Dati tecnici stampante SLM 280 [15] 18
Table 9. Dati tecnici stampante SLM 500 [15] 18
Table 10. Dati tecnici stampante DMP FLEX 350 [16] 19
Table 11. Dati tecnici stampante SPETTRA H [14] 21
Table 12. Dati tecnici stampante SPETTRA L [14] 22
Table 13. Dati tecnici stampante Q10 PLUS [14] 22
Table 14. Dati tecnici stampante Q20 PLUS [14] 22
Table 15. Dati tecnici stampante A2X [14] 22
Table 16. Riepilogo scenari analizzati 34
Table 17. Dati utilizzati per il calcolo dei costi diretti PBF-EB/M (Arcam A2X) 38
Table 18. Costi diretti processo PBF-EB/M (Arcam A2X) 38
Table 19. Dati utilizzati per il calcolo dei costi indiretti processo PBF-EB/M (Arcam A2X) 39
Table 20. Costi indiretti processo PBF-EB/M (Arcam A2X) 40
Table 21. Dati utilizzati per il calcolo dei costi diretti (processo PBF-LB/M) 43
Table 22. Costi diretti per processo PBF-LB/M 44
Table 23. Dati utilizzati per il calcolo dei costi indiretti (processo PBF-LB/M) 45
Table 24. Costi indiretti processo PBF-LB/M 46
Table 25. Sintesi prezzi dei principali competitor 51
Table 26. Analisi di prezzo dei lucchetti con raggruppamento per livello di sicurezza 52
Table 27. Conto economico processo PBF-EB/M 55
Table 28. Conto economico processo PBF-LB/M 58
Table 29. Confronto costi diretti (PBF-LB/M vs PBF-EB/M) 59
Table 30. Caratteristiche riassuntive dei due processi (PBF-LB/M vs PBF-EB/M) 59

1. INTRODUZIONE

Tra gli anni 80’ e 90’ è nata una nuova tecnologia chiamata *additive manufacturing* (AM), che si basa sulla costruzione di un componente (avente geometria più o meno complessa) tramite la deposizione ripetuta di strati di materiale. L’AM segue un’evoluzione piuttosto lenta: per i primi 20 anni viene impiegata per la realizzazione di qualsiasi tipologia di prototipo, da quelli concettuali a quelli preserie, tanto che in quel periodo ha assunto il nome di prototipazione rapida. A partire dagli anni 2000, anche grazie all’introduzione di nuovi materiali polimerici e metallici, è stata adoperata per la costruzione diretta di prodotti finiti. Ad oggi, la Manifattura Additiva è sempre più diffusa all’interno di industrie di diversi settori (aerospaziale, medicale, automotive, etc.) e contribuisce a quei cambiamenti radicali e innovativi che rientrano nelle opportunità che l’ultima rivoluzione industriale, denominata Industria 4.0., sta offrendo. Il valore aggiunto che apporta alle industrie si basa sull’automatizzazione quasi completa dei processi produttivi, che non richiedono più l’impiego di un numero notevole di operai, ma solamente di pochi tecnici altamente specializzati e necessari per definire i parametri iniziali e per supervisionare la fase di realizzazione del prodotto. L’AM ha il potenziale per rivoluzionare il modo in cui gli articoli vengono progettati, prodotti e distribuiti, in quanto consente la creazione di forme e strutture complesse, non realizzabili con i metodi di produzione tradizionali. Inoltre, offre la possibilità di ridurre gli sprechi, poiché viene utilizzato solo il materiale necessario per il prodotto finale, piuttosto che il materiale in eccesso richiesto nei tradizionali processi di produzione sottrattiva. Tutto ciò ha portato le aziende e gli studiosi a definire nuovi modelli di business esclusivi per questa tecnologia.

In questo contesto si inserisce il lavoro svolto in questa tesi di laurea magistrale, che ha come obiettivo lo sviluppo di un’analisi di costo per la produzione di un lucchetto per biciclette da realizzare con tecnologia additiva. Dopo un breve excursus sulle varie tecniche AM attualmente impiegate e sull’evoluzione storica dei principali modelli di costo, con riferimento al prodotto da realizzare, verranno confrontati due processi di produzione additiva per metalli: il Laser Beam Power Bed Fusion (PBF-LB) e l’Electron Beam Powder Bed Fusion (PBF-EB). I due processi in questione richiedono macchinari differenti, presentano tempi e capacità produttive diverse e quindi ad essi saranno associati distinti costi di realizzazione. Lo studio terrà conto anche del mercato attuale di lucchetti per bici e del suo possibile andamento futuro; sarà quindi inclusa un’analisi di prezzo e verrà determinata una quantità minima da raggiungere al fine di rendere sostenibile un possibile investimento.

2. CARATTERISTICHE DEL PRODOTTO E OBIETTIVI DELLA TESI

In questa tesi si vuole indagare la possibilità di introdurre nel mercato un'azienda che produca U-lock caratterizzati da una struttura alternativa e non convenzionale. Si è scelto di impiegare il nuovo prodotto nel settore dei lucchetti per biciclette, ma non si esclude la possibilità di ampliare l'orizzonte di mercato ad altri settori come i lucchetti per moto o per serrature.

Il lucchetto che si vuole realizzare presenta una struttura in fase di brevettazione da parte del Politecnico di Torino. In particolare, l'architettura proposta è composta da una struttura reticolare e da inserti posizionati all'interno delle porosità del reticolo (figura 1). Gli inserti sono flottanti nel senso che sono liberi di muoversi, all'interno della cavità dove sono posizionati, se sottoposti ad un qualunque carico quali ad esempio meccanico o fluidodinamico.
Questo tipo di lucchetto sarebbe particolarmente efficace nel caso di applicazione di un taglio meccanico, poiché, gli inserti comincerebbero ad oscillare generando un taglio instabile e una accelerazione dell'usura stessa dell'utensile [1]. Il ruolo degli inserti è di generare quindi un'azione di ostacolo al taglio. Il loro movimento, indotto dall'azione di taglio, è per l'utensile stesso deteriorante in quanto gli inserti stessi impartiranno un'azione meccanica sull'utensile, incrementando il fenomeno di vibrazione e generando un aumento della temperatura [1]. Questi due aspetti in maniera congiunta aumenteranno il tasso di usura della lama e il danneggiamento dell'utensile, rendendo il taglio inefficace. Invece, nel caso di taglio tramite tronchese, la presenza degli inserti durante il taglio compatterà la struttura rendendola simile al comportamento del materiale monolitico e quindi incrementando la resistenza al taglio [1].

Figura 1. Esempio della struttura reticolare con inserti [1]

Per semplicità è stato ipotizzato di avere solamente la struttura ad U del lucchetto, senza la testa bloccante. Tale struttura (con forma a U) ha un diametro pari a 14mm e un ingombro max pari a 100 x 193mm.

Il prodotto in questione potrebbe essere realizzato in diversi materiali. Nella seguente tabella vengono riassunti i materiali attualmente in uso nell'AM.

MATERIALI ORGANICI	**MATERIALI CERAMICI**	**MATERIALI POLIMERICI**	**MATERIALI METALLICI**
Cera	Alluminio	ABS	Alluminio
Tessuto/ cellulosa	Zirconio	Poliammide nylon	Acciaio
	Carburo di silicio	Filled PA	Titanio
	Beta-fosfato-tricalcico	PEEK	
	Ceramica	Epossidici termoindurenti	Inconel
	Sabbia di silice	PMMA	Cobalto-cromo
	Malta	Policarbonato	Rame
	Grafite	Polifenilsolfone	Acciaio inossidabile
		ULTEM	Oro/Platino
		Alluminio caricato con poliammide	Hastelloy

Table 1. Classificazione dei materiali utilizzati nell'additive manufacturing [2]

I materiali polimerici sono generalmente meno costosi e le stampanti 3D per questi materiali sono spesso più economiche di quelle per materiali metallici e sono disponibili in una gamma più ampia di dimensioni e prestazioni [3]. Nonostante la maggiore versatilità dei materiali plastici rispetto a quelli metallici (ad esempio, la possibilità di stampare con una maggiore varietà di colori e finiture) e la maggiore facilità di uso delle stampanti 3D, trattandosi di un lucchetto per bici, è necessario adoperare un materiale metallico e nello specifico si è scelto di realizzare il componente in lega di titanio Ti6Al4V mediante due possibili processi di additive manufacturing, precedentemente accennati il Laser Beam Power Bed Fusion (PBF-LB) e l'Electron Beam Powder Bed Fusion (PBF-EB).

Il capitolo successivo (capitolo 3.1) inizierà con una breve descrizione dei principali processi AM ed una più dettagliata delle due tecniche appena citate, includendo i principali produttori di stampanti 3D. Quindi, seguirà un'analisi dei principali modelli di costo presenti in letteratura, in cui saranno messi in risalto i pregi e i difetti dei vari studi.
Nel capitolo 3.2 verrà esposta l'analisi di costo relativo al nuovo lucchetto brevettato. Saranno calcolati i costi diretti e indiretti per i due scenari: il primo relativo al processo PBF-LB (con stampante EOS M290), e il secondo riguardante il processo PBF-EB (con stampante ARCAM A2X), verranno pertanto evidenziate le principali caratteristiche e i punti in comune tra le due tecniche produttive.
Successivamente (capitolo 4), sarà effettuata un'analisi del mercato di lucchetti per bici col duplice obiettivo di individuare i principali possibili competitor e di ottenere un prezzo medio di lucchetti con caratteristiche simili a quello che si vuole immettere sul mercato. Sulla base di questa indagine, per entrambi gli scenari, verrà individuato il punto di break-even e verrà esposta una previsione del conto economico.
A conclusione del lavoro, saranno confrontate le analisi svolte per i due processi traendo le opportune considerazioni sui costi da sostenere, sui tempi e sulla capacità produttiva di ogni scenario.

3. ANALISI DEI COSTI

Il processo di fabbricazione additiva è generalmente caratterizzato dal seguente ciclo di realizzazione:

1. 3D CAD MODELLING. Il componente viene progettato tramite un software CAD 3D, oppure può essere ottenuto da un pezzo già esistente, ad esempio, mediante il processo di Reverse Engineering.

2. GENERAZIONE DEL FILE STL. Il CAD ottenuto viene convertito in un file STL (Standard Triangulation Language), un formato in cui la superficie esterna è approssimata in triangoli di diverse dimensioni in modo da seguire il profilo del modello. Nonostante l'esistenza di altri formati (IGES, STEP, etc.) il formato STL risulta essere il più utilizzato nel mondo AM.

3. ORIENTAMENTO E GENERAZIONE DEI SUPPORTI. Un'operazione necessaria in alcune tipologie di processo è quella di ancorare il pezzo alla superficie di appoggio mediante la progettazione di supporti, i quali successivamente verranno rimossi o meccanicamente o mediante soluzioni chimiche. I supporti possono essere dello stesso materiale del prodotto o di diversa fattura. Invece, la scelta dell'orientamento dei pezzi potrebbe influire su alcune caratteristiche tecniche come, ad esempio, il livello di precisione nella realizzazione del componente.

4. SLICING. È una fase essenziale in tutti i processi di fabbricazione additiva. Consiste nell'intersecare il modello in formato STL con dei piani aventi normale parallela all'asse z, in modo tale da definire le sezioni di costruzione. Lo Slicing può essere costante (piani posizionati ad una distanza costante l'uno dall'altro) o adattativo (la distanza tra i piani varia al variare della complessità del modello). Quest'ultima non è un'operazione eseguibile per tutte le macchine e per tutti i processi.

5. ADDITIVE MANUFACTURING PROCESS. È la fase di stampa e realizzazione del componente. Durante la produzione il tempo e il consumo di energia variano al variare di diversi fattori come la geometria del componente, il materiale impiegato e il quantitativo di materiale di supporto inserito.

6. POST-PROCESS. Comprende le operazioni di rimozione dei supporti, pulizia (da polvere in eccesso) e finitura.

3.1 TECNICHE PRODUTTIVE E MODELLI DI COSTO PRESENTI IN LETTERATURA

Si introducono brevemente le tecniche maggiormente impiegate con materiali metallici, e si mettono in risalto le due tecniche utilizzate per questa tesi (PBF-LB e PBF-EB). Dopodiché, si procederà con l'analizzare gli aspetti gestionali, in particolare, verranno trattati i più noti modelli di costo di AM presenti in letteratura e verranno discussi i principali punti di forza e di debolezza.

3.1.1 DESCRIZIONE DEI PROCESSI AM

Nello schema seguente vengono riportate alcune delle principali tecniche di fabbricazione additiva utilizzate con materiali metallici.

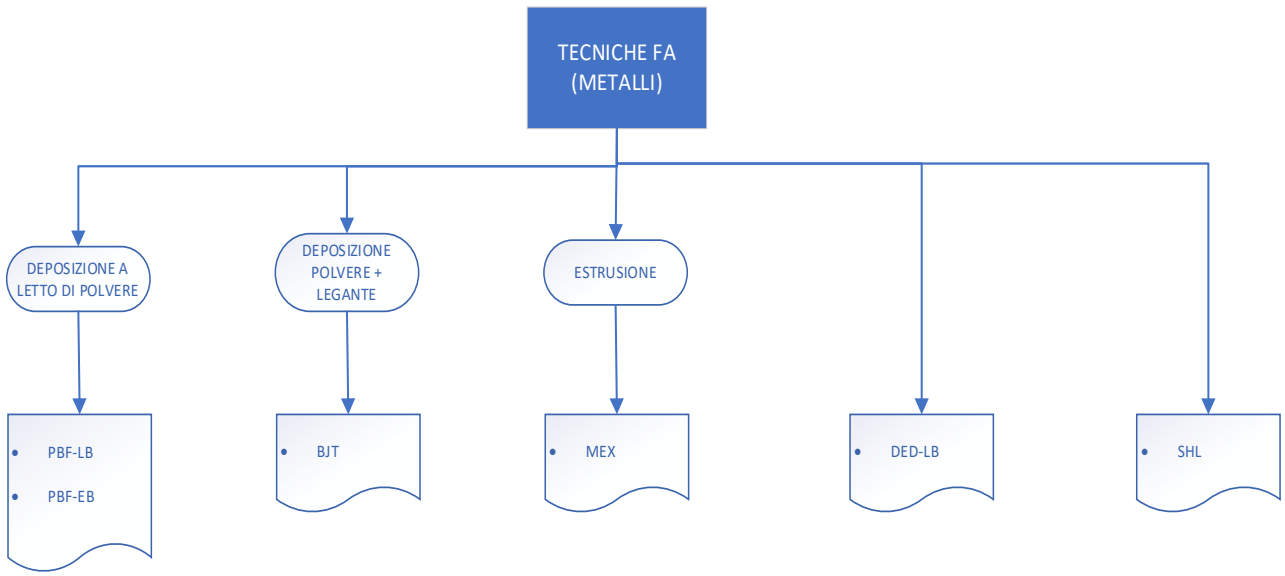


Figura 2. Tecnologie di AM per la produzione di componenti metallici [2], [4], [5].

Di seguito si riporta una breve descrizione per ogni processo produttivo.

- **PBF-LB (o SLM)**. La tecnica *Laser Beam Power Bed Fusion* [4] utilizza un laser per fondere la polvere di materiale, precedentemente depositata su l'intero piano di lavoro, e costruire l'oggetto strato dopo strato. In generale, viene adoperata sia con metalli che con materiali polimerici.
- **PBF-EB**. Nell'*Electron Beam Powder Bed Fusion* [4], a differenza della tecnica precedente, la polvere fonde tramite un fascio di elettroni.
- **DED-LB**. Nel *Laser Beam Directed Energy Deposition* [4] si ha la deposizione della polvere mediante ugelli e subito dopo si ha la fusione del materiale mediante un laser. In questo caso, la deposizione e la fusione della polvere avvengono quasi contemporaneamente punto per

punto. Con questa tecnica (utilizzata con materiali metallici), potenzialmente, si possono realizzare anche componenti in multimateriale.

- **BJT.** Nel processo *Binder Jetting* [4] una testina di stampa deposita del collante su un letto di polvere. Quando il collante impatta sulla polvere, penetra e permette alle particelle di aggregarsi. È particolarmente importante il dosaggio del collante per evitare che affondi nel letto di polvere.

- **MEX**. La tecnica Material Extrusion [4] prevede l'inserimento in macchina della materia prima e quindi il suo riscaldamento con l'obiettivo di renderla idonea per estruderla sul piano di lavoro attraverso un ugello di stampa. Questa tecnica può prevedere tre diversi sistemi di alimentazione: un sistema a vite (con l'impiego di polveri metalliche), uno a stantuffo (con l'utilizzo di barre metalliche) o un sistema a filamento (con filo metallico) [6]. Gli ultimi due sistemi presentano ancora delle limitazioni sulle tipologie di leghe adoperabili [6].

- **SHL**. Lo Sheet Lamination [4] è un processo che utilizza una fonte di energia ultrasonica o laser per impilare dei fogli metallici, precedentemente tagliati, al fine di realizzare un oggetto 3D [7].

Indipendentemente dalla tecnica impiegata l'AM si è ampiamente diffuso già in diversi settori. A partire da quello manifatturiero, dove viene utilizzato per la produzione di componenti e prototipi, consentendo una maggiore flessibilità nella produzione, una riduzione dei costi e una maggiore rapidità nella messa a punto di nuovi prodotti. Diversi processi vengono impiegati anche nel settore aerospaziale e difesa per la realizzazione di parti di aerei e veicoli spaziali, come ad esempio motori, serbatoi di carburante, componenti elettronici e strutture aerodinamiche. Nel settore automobilistico, l'additive manufacturing viene utilizzato per la produzione di componenti per automobili e veicoli a motore. L'impiego dell'AM nel settore medico invece consente la produzione di dispositivi medici, strumenti chirurgici e protesi specifiche e personalizzate per ogni singolo paziente. Infine, è impiegato anche per la personalizzazione di gioielli e orologi e trova spazio in architettura, design e nella ricerca.

Per l'analisi di costo che verrà sviluppata in questa tesi sono di particolare importanza due tecniche di produzione additiva: PBF-LB e PBF-EB. Segue una descrizione dettagliata dei due processi e un'analisi dei principali produttori di stampanti 3D e dei relativi macchinari disponibili.

LASER BEAM POWDER BED FUSION (PBF-LB)

Il processo PBF-LB/M [4] (si inserisce la lettera M per indicare che il materiale impiegato è un metallo [4]), noto anche con l'acronimo SLM (Selective Laser Melting), appartiene alla categoria dei processi additivi a letto di polvere ed è utilizzato per la produzione di componenti metallici. In passato questa tecnica prendeva il nome di SLS (Selective laser sintering) dovuto al fatto che l'energia del laser era insufficiente a raggiungere la completa fusione delle particelle metalliche. La polvere metallica, quindi, era miscelata con un binder ed era necessario un post-trattamento per l'eliminazione del binder e la riduzione di porosità. Tuttora, questa tecnica è conosciuta con diversi nomi provenienti dalle aziende produttrici che hanno sviluppato il proprio software macchina e, a volte, hanno modificato lievemente la struttura, ma senza arrecare cambiamenti alla tecnica in sé.

PROCESSO

La realizzazione del componente avviene tramite l'interazione di una sorgente di energia laser con le particelle di materiale contenute nel sistema. L'impianto opera in una camera di lavoro all'interno della quale viene inserito gas inerte (solitamente Argon) per evitare fenomeni indesiderati di ossidazione durante la fusione del materiale e di innesco di incendio a causa della polvere infiammabile. La piattaforma d'appoggio sulla quale è fabbricato il pezzo può essere riscaldata ad una data temperatura (in base al materiale utilizzato) e viene mantenuta a temperatura costante per tutta la durata del processo per attenuare i gradienti termici che si vengono a creare [8].

Il raggio laser passa attraverso un sistema di riflessione (sistema a specchi) e viene proiettato sulla piattaforma di lavoro dov'è presente la polvere. Le particelle di metallo così si aggregano a seguito dell'interazione col fascio luminoso. La potenza del laser può arrivare anche fino a 1000W e consente non solo la fusione dello strato di polvere in questione ma anche la completa adesione con quello precedentemente fuso [9].
Il raggio laser si sposta frequentemente da un punto ad un altro seguendo il percorso predefinito; così la temperatura del materiale varia rapidamente, passando dalla temperatura di fusione a circa quella ambiente in pochissimi millesimi di secondi, conferendo quindi ai componenti finali ottime prestazioni meccaniche.
Una volta che una sezione è stata completata, l'elevatore si muove lungo l'asse z, viene depositato e livellato un nuovo strato di polvere con una lama. A questo punto il laser fonderà la sezione successiva; questa sequenza si ripete fino al completamento del pezzo.
Il tempo che intercorre tra la fine della fusione di un layer e l'inizio della fusione del layer successivo viene definito tempo di recoating.
Al termine del processo il componente verrà estratto dalla camera di lavoro e si troverà ancorato alla piattaforma, in genere tramite dei supporti che verranno opportunamente rimossi. La presenza di supporti tra pezzo e piattaforma viene quasi sempre prevista in fase di progettazione per facilitare il distacco. Inoltre, risulta anche importante prevedere uno spazio vuoto sulla zona della piattaforma in cui saranno presenti le viti necessarie per ancorare la stessa alla macchina.

Si ricorda che la piattaforma da lavoro può essere riutilizzata per diversi job; tuttavia, prima dell'inizio di una produzione è sempre necessario sottoporre la piattaforma ad un processo di rettifica, dove per mezzo di una mola a grana molto fine vengono asportate piccole quantità di materiale ottenendo così una finitura superficiale estremamente precisa. Senza questa operazione, si avrebbe

una superficie non perfettamente planare a causa della presenza dei residui dei pezzi precedentemente rimossi.

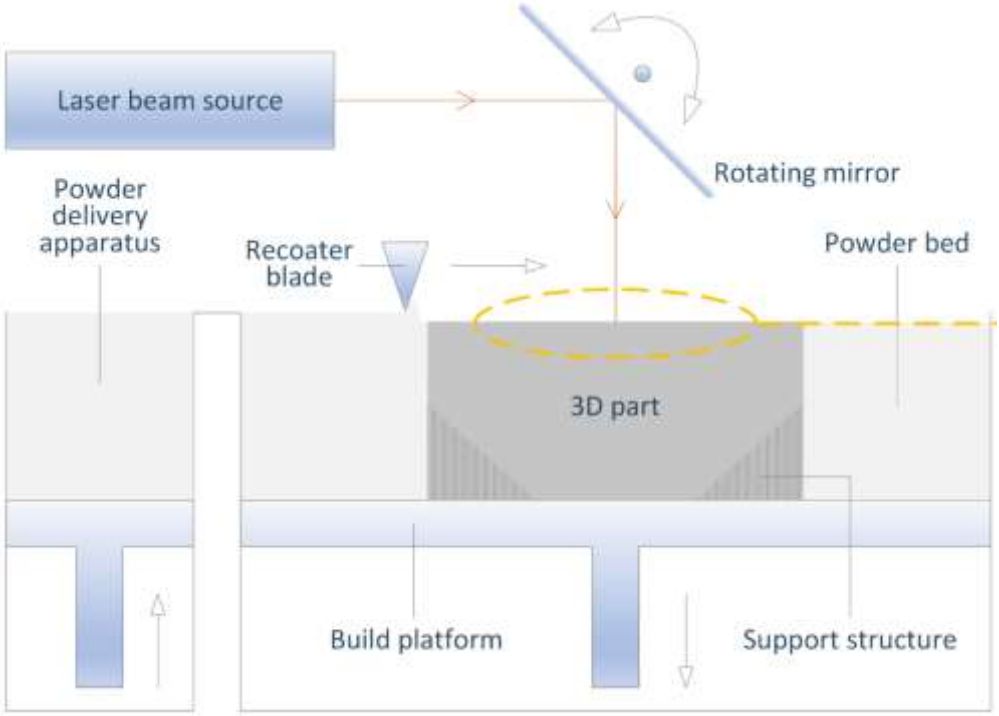


Figura 3. Schema rappresentativo di un sistema PBF-LB [10]

FASI DI POST-PROCESS

Le operazioni da seguire dopo l'estrazione sono:

- *Trattamento termico.* È un processo quasi sempre necessario quando si produce un pezzo in PBF-LB/M. Esso permette un aumento della duttilità ed una riduzione delle tensioni residue che si sono generate a seguito di un processo di solidificazione molto veloce. Il trattamento termico viene sempre eseguito prima di distaccare i componenti dalla piattaforma di costruzione della macchina.

- *Rimozione dei supporti.* La rimozione dei supporti può avvenire manualmente con comuni strumenti da lavoro quali martello e scalpello, oppure per mezzo della tecnologia di elettroerosione a filo (WEDM). L'elettroerosione a filo utilizza un filo conduttore come elettrodo con lo scopo di tagliare il profilo di ogni singolo componente. Le elettroerosioni a filo sono estremamente precise e offrono una maggiore versatilità, rapidità di esecuzione e affidabilità.

- *Rimozione della polvere non parzialmente fusa dal componente.* In genere questa operazione avviene tramite il processo di pallinatura. Consiste nello sfruttare l'energia centrifuga di una turbina per scagliare la graniglia abrasiva (microsfere di vetro, di ceramica, di plastica o d'acciaio) contro la superficie che deve essere sottoposta al trattamento. In questo modo si riesce ad eliminare in maniera accurata tutta la polvere metallica non fusa adesa alla superficie.

Figura 4. Esempio di un macchinario per pallinatura [11]

- *Finitura superficiale.* Abbastanza comune è la finitura manuale, dove s'intende una carteggiatura del componente da parte di un operatore esperto. In alcuni casi invece è possibile prevedere un sovrametallo ed operare mediante una lavorazione meccanica come la fresatura o altri sistemi di finitura superficiale (AFM, lucidatura elettrochimica, etc).

I MATERIALI

Le particelle di polvere devono essere perfettamente sferiche, in modo da poter scivolare l'una sull'altra quando vengono stese dalla lama. La loro granulometria, in genere, è compresa tra 15 – 45 μm e gli spessori di strato, distribuiti dalla lama, si aggirano tra 20 – 60 μm in base all'applicazione. Le particelle inoltre devono presentare il minor numero di porosità possibili per consentire al componente prodotto di avere la massima densità. Per ottenere tutte queste caratteristiche è necessario un processo di realizzazione delle polveri complesso che porta a raggiungere costi abbastanza elevati.

I principali materiali impiegati sono [9], [12]:

- Lega di alluminio: AlSi10Mg, AlSi12, AlSi7Mg
- Lega di titanio: Ti6Al4V
- Leghe Ferro-Carbonio (MS1 Maraging 300; AISI 4340; Inox 17-4 Ph, Inox 15-5; AISI 316L)
- Leghe Cromo-Cobalto (CoCrMo MP1; CoCrMo SP2)
- Leghe di Nichel (Inconel 625; Inconel 718; Hastelloy X)
- Leghe Au.

PRODUTTORI E MACCHINE PER SLM

Nel corso degli anni diverse società hanno ripreso e ampliato questa tecnologia sviluppando dei macchinari col proprio marchio, tra i quali troviamo:

- EOS GmbH
- CONCEPT LASER
- SLM SOLUTION
- 3D SYSTEM
- RENISHAW

EOS GmbH

È un'azienda tedesca specializzata nella produzione di stampanti 3D industriali. Fondata nel 1989, è considerata una delle principali aziende a livello mondiale, con sedi in tutto il mondo e una vasta gamma di tecnologie di stampa 3D. EOS utilizza questo tipo di tecnologie per produrre componenti in metallo, plastica e compositi. Le principali macchine che ha a disposizione per la produzione di oggetti in metallo sono:

EOS M290

La stampante 3D EOS M290 è una macchina di produzione di metalli basata su una tecnologia di fusione laser a letto di polvere. Con la M290 si possono adoperare una vasta gamma di materiali, tra cui acciaio inossidabile, alluminio, titanio e leghe leggere. Permette di ottenere pezzi di alta qualità grazie ad un efficiente sistema di controllo che consente di monitorare i parametri di stampa in modo accurato. Inoltre, è in grado di lavorare con una varietà di software di preparazione dei modelli e ha un'interfaccia utente semplice che consente di gestire facilmente la stampa 3D. In tabella vengono riportate alcune delle caratteristiche principali.

Caratteristica tecnica	**Valore**
Dimensioni interne (LxWxH)	250X250X325mm
Velocità di scansione	Fino a 7m/s
Potenza tot media richiesta	2.4 kW
Potenza laser	400W

Table 2. Dati tecnici stampante EOS M290 [13]

EOS M300-4

L'M300 è adatta per la produzione di parti di grandi dimensioni e per la produzione di pezzi con elevata precisione. Questo la rende conveniente per le aziende che richiedono un'elevata produzione di parti di qualità con una grande flessibilità di materiali.

Caratteristica tecnica	**Valore**
Dimensioni interne (LxWxH)	300 x 300 x 400 mm
Velocità di scansione	Fino a 7m/s
Potenza tot media richiesta	26 kW (max 36kW)
Potenza laser	4 x 400 W

Table 3. Dati tecnici stampante EOS M300 [13]

EOS M400

È la versione successiva alla M300 e presenta dimensioni e potenza maggiori. Esiste sia la versione con una sorgente laser da 1000W sia quella con 4X400W.

Caratteristica tecnica	Valore
Dimensioni interne (LxWxH)	400 x 400 x 400 mm
Velocità di scansione	Fino a 7m/s
Potenza tot media richiesta	16.22 kW (max 50.2 kW)
Potenza laser	1000 W o 4X400W

Table 4. Dati tecnici stampante EOS M400 [13]

CONCEPT LASER

Concept Laser è un'azienda tedesca fondata nel 2000, è specializzata nella produzione di stampanti industriali ed offre anche molti servizi di stampa 3D. Il suo brand è diffuso in tutto il mondo e ad oggi propone diverse soluzioni con tecnologia PBF-LB.

M2 SERIE 5

È disponibile nella versione con 2 laser dalla potenza di 1000W o 400W.

Caratteristica tecnica	Valore
Dimensioni interne (LxWxH)	245 x 245 x 405 mm
Velocità di scansione	Fino a 4.5m/s
Potenza tot media richiesta	n.d.
Potenza laser	1000 W o 400W

Table 5. Dati tecnici stampante M2 [14]

X LINE 2000

È una delle macchine per stampa 3D più grandi in commercio, viene utilizzata per la produzione di componenti per l'industria aerospaziale e automobilistica. Questa macchina innovativa è caratterizzata dalla separazione della stazione di processo e di movimentazione, che garantisce sia un funzionamento sicuro della macchina che una movimentazione più semplice.

Caratteristica tecnica	Valore
Dimensioni interne (LxWxH)	800 x 400 x 500 mm
Velocità di scansione	Fino a 4.5m/s
Potenza tot media richiesta	13 kW
Potenza laser	2 X 1000 W

Table 6. Dati tecnici stampante X LINE 2000 [14]

SLM SOLUTION

È una società tedesca quotata in borsa, con sede a Lubecca, che produce stampanti 3D con tecnologia a fusione di polveri di metalli. Tra i suoi obiettivi vi è la possibilità di aiutare a portare i clienti alla produzione in serie mediante l'utilizzo di stampanti 3D.

SLM 125

La SLM 125 è ideale per una varietà di utilizzi, dalla prototipazione rapida e produzione di piccoli volumi alla produzione in serie e ai lavori di ricerca.

Caratteristica tecnica	Valore
Dimensioni interne (LxWxH)	125 x 125 x 125 mm
Velocità di scansione max	10 m/s
Potenza tot media richiesta	3 kW
Potenza laser	400 W

Table 7. Dati tecnici stampante SLM 125 [15]

SLM 280

La serie di produzione SLM 280 fornisce un flusso di gas laminare brevettato che crea una camera di lavoro ottimale per l'intero processo produttivo. Il trasporto, la setacciatura e lo stoccaggio della polvere sono contenuti in un'atmosfera di gas inerte per mantenere elevata la qualità della polvere.

Caratteristica tecnica	Valore
Dimensioni interne (LxWxH)	280 x 280 x 365 mm
Velocità di scansione max	10 m/s
Potenza tot media richiesta	5.5 kW
Potenza laser	700 W

Table 8. Dati tecnici stampante SLM 280 [15]

SLM 500

Rappresenta il primo sistema in metallo quad-laser sul mercato, SLM 500 può integrare i laser in modo indipendente o in parallelo al fine di aumentare i tassi di costruzione del 90% rispetto alle configurazioni a doppio laser.

Caratteristica tecnica	Valore
Dimensioni interne (LxWxH)	500 x 280 x 365 mm
Velocità di scansione max	10 m/s
Potenza tot media richiesta	10 kW
Potenza laser	4 X 400 W or 4 X 700 W

Table 9. Dati tecnici stampante SLM 500 [15]

3D SYSTEMS

3D Systems, è un'azienda statunitense con sede a Rock Hill, specializzata nella produzione di stampanti 3D, materiali stampabili, servizi professionali di parti personalizzabili e software di grafica 3D. 3D SYSTEM supporta i clienti attraverso database di materiali per la stampa 3D che permettono una migliore gestione dei parametri del processo di stampa.

Come stampante per la produzione di articoli di media dimensione troviamo:

DMP FLEX 350 (or DUAL)

Caratteristica tecnica	Valore
Dimensioni interne (LxWxH)	275 x 275 x 420 mm
Velocità di scansione max	n.d.
Potenza tot media richiesta	10 kW
Potenza laser	1 X 500 W or 2 X 500 W

Table 10. Dati tecnici stampante DMP FLEX 350 [16]

RENISHAW

È un'azienda di engineering britannica con sede a Wotton-under-Edge, Gloucestershire. La linea di prodotti interessa i tastatori per macchine CNC e taratura, gli encoder lineari, i trasduttori di posizione angolare, i dispositivi medici per neurochirurgia e macchinari per stampa 3D con tecnologia SLM.

Tra i suoi prodotti per la stampa 3D in metallo si trova la serie RenAM 500. Questa serie di macchine possono essere configurate con uno o quattro laser ad alta potenza da 500 W e con sistemi automatici o flessibili (Flex) per la gestione di polveri e scarti. Inoltre, utilizzano lo stesso sistema di flusso del gas, le protezioni e le ottiche digitali di precisione per tutte le operazioni, dal proof of concept dei materiali, fino alla produzione in grandi volumi [17].

ELECTRON BEAM POWDER BED FUSION (PBF-EB)

L' Electron Beam Powder Bed Fusion (PBF-EB/M), conosciuta anche con il nome electron beam melting (EBM), è un processo di additive manufacturing che utilizza un fascio elettronico ad alta energia per fondere, strato per strato, polveri di materiali metallici.

PROCESSO

Il processo PBF-EB/M ha inizio nella camera di costruzione all'interno della quale si possono distinguere tre elementi: nella parte centrale la piastra di costruzione, 2 tramogge contenenti la polvere e la racla necessaria per la stesura degli strati.
Nella parte superiore della macchina è presente un elemento cilindrico chiamato "cannone elettronico" all'interno del quale si trova il catodo che può essere un filamento di tungsteno o un cristallo sintetico. Nel caso di filamento di tungsteno, esso viene riscaldato fino all'emissione di elettroni. Appena al di sotto è presente l'anodo che con il catodo genera quella differenza di potenziale necessaria per accelerare gli elettroni. Il fascio di elettroni accelerato procede verticalmente verso il basso dove sono presenti tre lenti: la prima, "lente di astigmatismo" conferisce al fascio la forma circolare o ovale, la seconda, "focus lens" controlla la dimensione del fascio e la terza, "lente di deflessione", devia il fascio fino al punto desiderato sulla piattaforma di costruzione. Nel momento del contatto, l'energia cinetica degli elettroni si trasforma in calore permettendo la fusione delle particelle di polvere. L'intero processo avviene sottovuoto dal momento che gli elettroni in presenza di aria potrebbero interagire con le particelle gassose ed essere deviati [18].

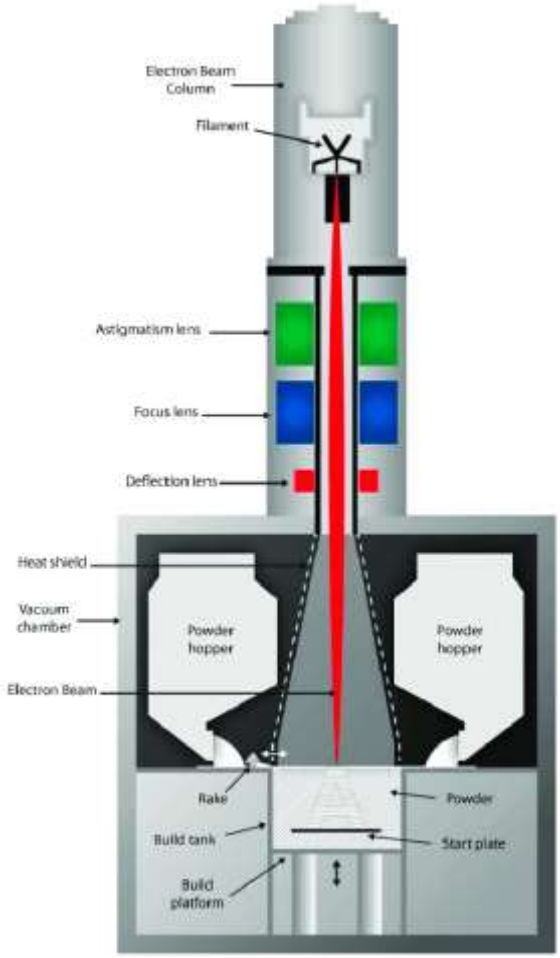


Figura 5. Schema rappresentativo di un processo EBM [18]

Nella fase iniziale del processo si ha il preriscaldamento della piastra ad una data temperatura (in base alla tipologia di materiale) e, prima della fusione, la polvere viene preriscaldata mediante il passaggio ripetuto del fascio defocalizzato ad elevata velocità. Successivamente, il fascio fonde la polvere ad una potenza e una velocità ridotta. Una volta che il fascio di elettroni ha fuso tutti i punti previsti nel primo strato, la piattaforma si abbassa lungo l'asse z di una distanza pari alla dimensione del layer previsto e viene steso un nuovo strato di polvere per mezzo di una racla. Tale processo si ripete fino alla realizzazione del componente.

Durante il processo viene insufflata una piccola quantità di elio alla pressione di 10^ (-1) Pa per evitare il sorgere di cariche elettriche nelle polveri e per assicurare la stabilita termica del processo stesso [2]. La conclusione del processo si ha con il raffreddamento del pezzo per mezzo di un circuito di raffreddamento a liquido e mediante il passaggio di un flusso di elio nell'ambiente di lavoro.

È bene ricordare che il processo PBF-EB/M richiede in rari casi l'impiego di supporti e quindi può essere occupato tutto il volume a disposizione durante il processo di stampa.

FASI DI POST-PROCESS

Dopo il raffreddamento, avviene l'operazione di rimozione e recupero della polvere inutilizzata usando il cosiddetto Powder Recovery System (PRS). Nel PRS, la stessa polvere adoperata per la realizzazione del pezzo viene usata per spazzare via la polvere sinterizzata che circonda il

componente. Le polveri non utilizzate, dopo essere state setacciate, possono essere riciclate molte volte senza che la composizione chimica o le proprietà fisiche siano alterate, grazie al fatto che non vi è ossigeno all'interno della camera di lavoro durante il processo [19]. Lo spreco di materiale è quindi ridotto al minimo.

Poiché la realizzazione dei componenti avviene già a temperature abbastanza elevate non sono, in genere, necessari ulteriori trattamenti termici. Sono invece spesso richieste operazioni di finitura per ridurre la rugosità superficiale del componente.

I MATERIALI

La geometria della polvere gioca un ruolo importante per la realizzazione di un buon manufatto anche nel processo PBF-EB; la forma sferica delle particelle e la minore rugosità della superficie migliorano la densificazione favorendo la compattazione delle polveri nel letto (minore grado di vuoto) in modo da evitare la formazione di difetti (vuoti e porosità) nel manufatto. Inoltre, la forma sferica favorisce la scorrevolezza delle particelle e quindi la loro distribuzione. Nel processo PBF-EB la frazione di particelle varia tra 45-150 μm, un valore superiore rispetto al processo PBF-LB, e pertanto anche meno costose [18].

Tra le tipologie di materiali principalmente impiegate si trovano: acciaio inossidabile (17-4), acciaio per utensili (H13), superleghe di nichel (625 e 718), superleghe a base cobalto (Stellite 21, Arcam ASTM F75 CoCr), metalli duri (NiWC), rame, niobio e berillio e leghe di titanio (Ti6Al4V, Ti6Al4V ELI) alluminio. Quest'ultime due risultano essere le più utilizzate [20], [2], [19].

PRODUTTORE E MACCHINE

La tecnologia EBM è stata brevettata dall'azienda Arcam AB, che ha sede a Molndal, in Svezia e che nel 2016 e stata acquisita dalla multinazionale statunitense General Electric.

Le macchine sviluppate per la realizzazione di componenti mediante processo EBM sono:

SPETTRA H

Spettra H può raggiungere elevate temperature (anche superiori a 1000°C) così da consentire l'utilizzo di nuove leghe nella produzione.

Caratteristica tecnica	**Valore**
Dimensioni interne (ØxH)	250 x 430 mm
Potenza tot media richiesta	10.4 kW
Potenza del fascio	6 kW

Table 11. Dati tecnici stampante SPETTRA H [14]

SPETTRA L

Spectra L offre il più grande volume di costruzione delle macchine Arcam EBM, consentendo una maggiore capacità di produrre parti grandi e ad alta integrità e velocità.

Caratteristica tecnica	Valore
Dimensioni interne (ØxH)	350 x 430 mm
Potenza tot media richiesta	10.4 kW
Potenza del fascio	4.5 kW

Table 12. Dati tecnici stampante SPETTRA L [14]

Q10 PLUS

È una macchina dai volumi ridotti e molto richiesta soprattutto nel settore aerospaziale e dell'ortopedia.

Caratteristica tecnica	Valore
Dimensioni interne (LxWxH)	200 x 200 x 180 mm
Potenza tot media richiesta	7 kW
Potenza del fascio	3kW

Table 13. Dati tecnici stampante Q10 PLUS [14]

Q20 PLUS

Presenta un involucro cilindrico di medie dimensioni. È stata progettata in particolare per la produzione economica di componenti aerospaziali.

Caratteristica tecnica	Valore
Dimensioni interne (ØxH)	350 x 380 mm
Potenza tot media richiesta	7 kW
Potenza del fascio	3kW

Table 14. Dati tecnici stampante Q20 PLUS [14]

A2X

Pensata e sviluppata per il mondo accademico e più in generale per lo sviluppo di prodotti nuovi e innovativi.

Caratteristica tecnica	Valore
Dimensioni interne (LxWxH)	200 x 200 x 380 mm
Potenza tot media richiesta	7 kW
Potenza del fascio	3 kW

Table 15. Dati tecnici stampante A2X [14]

3.1.2 PRINCIPALI MODELLI DI COSTO DELLA PRODUZIONE ADDITIVA

Si procede, quindi, col descrivere i principali modelli di costo. Seguendo un ordine cronologico si analizzeranno prima i modelli fondanti, che caratterizzano tuttora il punto di partenza per un'analisi di costo, e successivamente anche alcuni casi più specifici relativi a determinate condizioni o a particolari elementi da realizzare.

MODELLI DI COSTO TRADIZIONALI (2003-2015)

MODELLO DI HOPKINSON E DICKNES (2003)

Nonostante fino agli inizi degli anni 2000 l'additive manufacturing venisse impiegata principalmente per la realizzazione di prototipi, Hopkinson e Dickens (HD) avevano previsto uno sviluppo della tecnologia fino al raggiungimento di una produzione su larga scala. A tal proposito hanno sviluppato un'analisi di costo in cui confrontano il classico modello di produzione di stampaggio a iniezione con i processi di additive manufacturing (stereolitografia, modellazione di deposizione fusa e sinterizzazione laser). Il risultato del confronto si può vedere in figura 6.

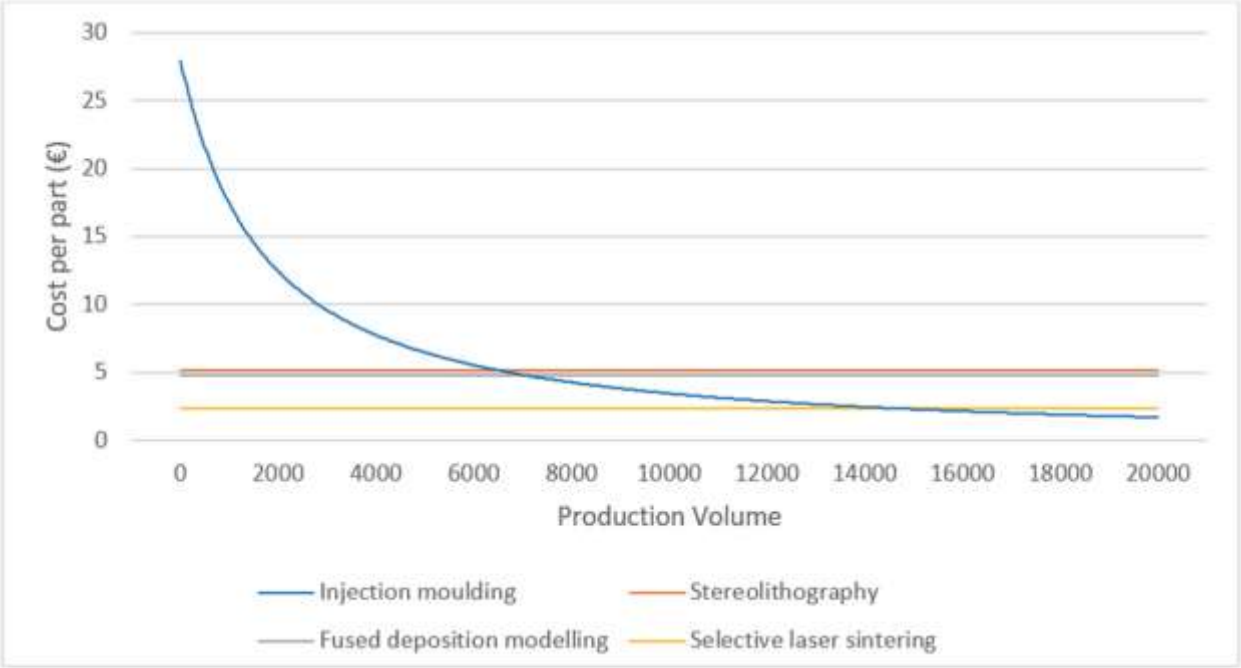


Figura 6. Confronto tra processo AM e tradizionale [21]

I risultati hanno dimostrato, come si può evincere anche dal grafico, che per grandi volumi di produzione convengono maggiormente i processi tradizionali; tuttavia, l'AM diventa interessante nel momento in cui bisogna realizzare geometrie complesse o prodotti in cui sono necessari particolari tipologie di stampi. È bene precisare che HD hanno calcolato i costi per parte tenendo conto del costo relativo ai macchinari, del materiale e del lavoro impiegato [21].

Il modello HD non è perfetto; ad esempio, i ricercatori non considerano il riciclo di polveri non utilizzate nel processo AM, come non considerano che la capienza della stampante potrebbe non essere sempre satura. Inoltre, il volume di produzione non fa riferimento alla domanda di mercato ma deriva dalla moltiplicazione del numero di pezzi prodotti da una stampante per il numero di ore di lavorazione, quando invece è il mercato ad influenzare l'attività produttiva e non viceversa. Un altro elemento trascurato da HD è il consumo di energia, che ha un basso impatto sui costi totali, ma al giorno d'oggi non è più un elemento totalmente escludibile, considerando l'aumento del costo ad essa associato [21]. Probabilmente l'esclusione del costo dell'energia è dovuta anche al fatto che i processi AM maggiormente diffusi fino a quel momento erano quelli per la realizzazione di oggetti in policarbonato e polipropilene che richiedono un consumo energetico nettamente inferiore rispetto a quelli per oggetti metallici.
A ciò si aggiunge che HD hanno considerato nel loro modello un numero di ore di produzione estremamente eccessivo (328 giorni su 360), premettendo che i macchinari possano lavorare h24 [21]. Un'ipotesi in linea teorica fattibile trattandosi di macchine e non di esseri umani, ma ancora una volta poco realistica se si tiene conto di eventuali tempi di setup, manutenzioni, guasti o chiusure aziendali. Bisogna anche sottolineare che un confronto tra processo tradizionale e AM risulta completamente valido se i componenti hanno le stesse caratteristiche, ma in questo caso gli autori non hanno considerato post-lavorazioni come, ad esempio, trattamenti termici o di finitura superficiale che sono spesso indispensabili nella fabbricazione additiva.

Tutte queste osservazioni mostrano come il modello fino ad ora descritto sia ancora un po' approssimativo e rappresenti solo un punto di partenza. HD, infatti, non avevano molta esperienza di utilizzo delle tecnologie AM nel settore manifatturiero né tantomeno in contesti produttivi su larga scala. Gli studi successivi hanno risolto e arricchito il modello di costo.

MODELLO DI RUFFO ET AL. (2006)

Ruffo et al. erano convinti che la curva di costo del processo AM dovesse avere un andamento simile a quella del processo tradizionale. Effettuarono quindi alcune modifiche al modello di partenza di HD, basandosi su una ripartizione dei costi in base alle attività svolte e suddividendoli a loro volta in costi diretti e indiretti. Per loro gli unici costi diretti erano quelli relativi al materiale utilizzato. Allocarono invece i costi di manodopera, dei macchinari, le spese generali di produzione e le spese amministrative nei costi indiretti [22]. Tra le spese generali sono stati inseriti anche i costi relativi all'energia, una scelta forse discutibile dal momento che quest'ultimi potrebbero far riferimento in maniera diretta al prodotto e quindi essere allocati tra i costi diretti.

La somma di costi diretti e indiretti forniva il costo relativo a un job di produzione.

In questo modello, a differenza di quello precedente, viene considerato un tempo di lavoro della macchina pari a 210 giorni su 365 (più realistico); nello specifico hanno definito l'orario di lavoro in 100 ore settimanali, per 50 settimane all'anno [21].

Inoltre, questo modello considera da un lato una riduzione di costo dovuto ad un aumento considerevole della produzione, dall'altro un aumento di costo a seguito di tre diverse situazioni:

- Quando è necessario sviluppare una nuova parte nella direzione x, all'interno del macchinario di stampa
- Quando è necessario aggiungere un nuovo strato per l'aggiunta di una parte superiore.

- Quando è necessario aggiungere un nuovo letto e quindi iniziare un nuovo lavoro nella zona superiore.

In tutte e tre le situazioni si creano temporaneamente degli aumenti di costo improvvisi (come si può notare dai picchi nel grafico in figura 7). Al contrario, a seguito di un aumento sostanziale del numero di parti si riuscirebbe ad avere la saturazione completa dei macchinari e quindi l'ottimizzazione del processo stesso come evidenzia il modello nella seguente figura.

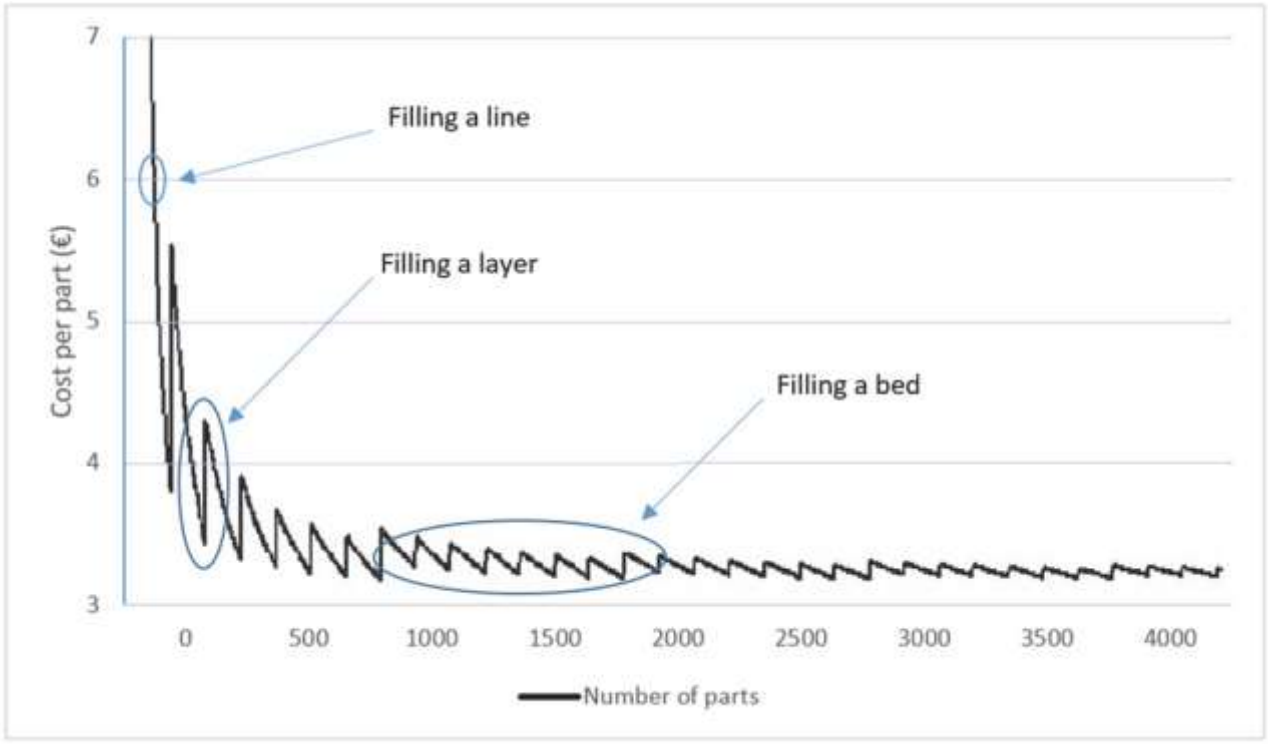


Figura 7. Andamento del costo del processo AM [21]

Ruffo et Al. dimostrano così che l'andamento di costo del processo AM è simile a quello tradizionale ma introducono la presenza dei picchi appena descritti. Il loro modello può essere considerato più preciso e accurato di quello precedente anche perché includono in parte il riciclo di polvere quando possibile.

MODELLO DI BAUMERS ET AL (2012)

In questo modello viene impiegato uno stimatore dei costi basato sull'ABC (Activity Based Costing), come quello ideato da Ruffo et al., ma che include al suo interno anche i costi energetici raggruppati come costi diretti.

Un'osservazione importante introdotta da Baumers et al. è che la produzione di AM, entrando in concorrenza diretta con la produzione di massa convenzionale, potrebbe dover affrontare il problema di non essere in grado di raggiungere le economie di scala ottenibili con i processi tradizionali.

I ricercatori inoltre definirono meglio il costo associato ad un job come [21]:

$$C_{produz.} = (C_{indiret} \times T_{produz.}) + (W \times P_{materiale}) + (E_{produz.} \times P_{energia})$$

Dove:

- $C_{produz.}$: è il costo relativo alla produzione di un job di lavoro contenuto in una macchina
- $T_{produz.}$: è il tempo necessario per realizzare il job
- W: è il quantitativo di materiale utilizzato
- $P_{materiale}$: è il prezzo del materiale
- E_{produz}: è l'energia necessaria per realizzare il job
- $P_{energia}$: è il prezzo dell'energia

Il modello di Baumers et al. migliora rispetto ai modelli di costo precedenti, perché in esso è allocato e definito il costo dell'energia. Tuttavia, nemmeno loro effettuano un'analisi relativa alle fasi di post lavorazione (post-elaborazione e rimozione di materiale).

In sintesi, si potrebbe dire che fino a questo momento ogni modello di costo analizzato presenti dei vantaggi e degli svantaggi, ma che nessuno in particolare soddisfa ancora tutti i criteri richiesti.

MODELLO LINDEMANN (2012)

In questo modello di costo come metodo di calcolo, è stato adottato un approccio "Time Driven Activity Based Costing" [21]. "Time Driven" significa che l'assegnazione dipende dalla durata delle attività. Nello specifico, sono state individuate le seguenti attività:

- Preparazione del lavoro di costruzione;
- Produzione del job;
- Rimozione manuale delle parti;
- Post-elaborazione per migliorare le proprietà del materiale;

Come si può notare, in questo caso è stata introdotta per la prima volta la fase di post elaborazione dei componenti. Come anche per gli altri modelli il costo di produzione è dato dalla sommatoria dei costi delle varie attività.

MODELLO DI RICKENBACHER ET AL. (2013)

Dopo ormai diversi anni di applicazioni di tecnologia additive si è capito che una condizione necessaria per ridurre i costi è cercare di saturare il più possibile la camera di lavoro della macchina. Per effettuare ciò è spesso necessario dover inserire in uno stesso job componenti aventi geometrie diverse e spesso destinati anche ad impieghi differenti. Risulta a questo punto interessante analizzare il costo di ogni singolo componente e non solo dell'intero job di produzione. Questo modello si propone proprio come obiettivo il superamento di questo ostacolo, ovvero riuscire a calcolare il costo di una singola parte, sebbene possa essere prodotta insieme ad altre parti aventi geometrie differenti.

Per ottenere ciò, gli autori cercano una soluzione per calcolare il tempo di costruzione relativo ad ogni singola parte. A tal proposito, suppongono di avere in un job dei pezzi con geometrie differenti

ma altezza simile in modo tale che il criterio di assegnazione del tempo possa essere proporzionale alla sezione trasversale corrispondente della parte o proporzionale alla quantità di strati delle fette definite. Quindi, per stimare il tempo di costruzione, Rickenbacher et al. (2013) hanno utilizzato un modello di regressione lineare derivato da 24 diversi lavori di costruzione. Loro definiscono la seguente equazione dalla quale riescono a calcolare i coefficienti di regressione [21].

$$\sum T_{costruz}(P_i) = a_0 + a_1 \times N_L + a_2 \times V_{tot} + a_3 \times S_{supp.tot} + a_4 \times \sum N_i + a_5 \times S_{tot}$$

Dove:

$T_{costruz}$: è il tempo necessario per la costruzione di un job

P_i: è la parte con la geometria i-esima

a_0, $a_{1,...,}$ a_5: sono I coefficienti di regressione

N_L: è il numero di layers

V_{tot}: è il volume totale del job

$S_{supp.tot}$: è la superficie occupata dalle strutture di supporto

N_i: corrisponde al numero di parti presenti nel job con geometria i-esima

S_{tot}: è la superficie totale del job

I coefficienti di regressioni appena individuati (a_0, $a_{1, ..,}a_5$) sono stati quindi utilizzati per individuare il tempo necessario per ogni singola parte usando la seguente equazione:

$$T_{costruz}(P_i) = (a_0 / \sum N_i) + T_L P_i + a_2 * V(P_i) + a_3 \times S_{supp.}(P_i) + a_4 + a5 \times S(P_i)$$

Dove:

T_L : è la frazione di layer relativa alla parte

$V(P_i)$: è il volume della parte i-esima

$S_{supp.}$ (P_i): corrisponde alla superficie occupata dai supporti

$S(P_i)$: è la superficie occupata dalla parte i-esima

L'algoritmo proposto per allocare la frazione temporale del tempo totale di costruzione ad ogni parte realizzata è semplice ed efficace; tuttavia, il tempo di costruzione attribuito ad ogni singola parte

potrebbe non essere sempre così realistico dal momento che nell'additive manufacturing le geometrie dei componenti sono spesso molto complesse ed estremamente variabili. Pertanto, una regressione basata su soli 24 differenti lavori potrebbe non essere sufficiente per avere dei risultati sempre attendibili.

Un'altra imprecisione che bisogna sottolineare è che il modello non tiene conto del consumo di energia; un costo non sempre trascurabile, in particolare nei processi AM con metalli.

Nonostante qualche imprecisione e la non certa attendibilità dell'algoritmo il lavoro di Rickenbacher et al. rappresenta un notevole passo in avanti agli studi effettuati sino a quel momento.

MODELLO DI SCHRÖDER ET AL. (2015)

Gli autori, a seguito di uno studio basato su interviste rivolte a esperti e ricercatori operanti nel settore AM, hanno identificato sette fasi del processo additivo da tenere in considerazione per un'analisi dei costi:

- Progettazione e pianificazione;
- Lavorazione dei materiali;
- Preparazione della macchina;
- Produzione;
- Post-elaborazione;
- Amministrazione e vendite;
- Qualità.

Hanno quindi sviluppato un foglio di calcolo Excel per ottenere un valore di costo relativo all'intero processo produttivo. Il calcolo si basa sulla sommatoria dei costi relativi alle sette attività appena evidenziate [21].

Come si può notare, a differenza dei modelli precedenti hanno introdotto l'attività di progettazione, e l'attività di controllo qualità sicuramente quasi sempre presenti per la realizzazione di un componente. Spesso tali voci non sono trascurabili e quindi il loro inserimento contribuisce a rendere l'analisi più precisa e accurata. Discutibile invece potrebbe essere la scelta di inserire un costo associato all'amministrazione e alle vendite per l'analisi dei costi diretti, poiché non si tratta di spese direttamente correlate col processo industriale.

Dal modello di Schröder et al. emerge che le spese relative all'investimento dei macchinari impattano maggiormente sui costi, e che le economie di scala sono facilmente raggiungibili con prodotti di piccole dimensioni, mentre per prodotti di grande volume il costo risulta essere indipendente dalla quantità ordinata [21].

CONSIDERAZIONI

Nel corso del tempo, vari studi hanno migliorato l'analisi di costo per processi AM, rendendola sempre più precisa e attendibile, anche grazie all'individuazione e allo studio sempre più dettagliato di tutte le fasi che caratterizzano il processo produttivo. Tuttavia, in nessun modello si riscontra uno studio dei costi e della realizzazione di economie di scala in relazione alle dimensioni generali del mercato e alla domanda ad esso associata; un elemento che invece risulta essere molto importante per un'impresa che ha intenzione di innovare investire in questa tecnologia.

STUDI E CASI APPLICATIVI RECENTI SULL'AM PRESENTI IN LETTERATURA

Oltre ai classici modelli appena descritti sono stati analizzati anche i più recenti studi presenti in letteratura, che a differenza di quelli precedenti risultano essere meno teorici e spesso applicati già in contesti aziendali concreti. Alcuni di questi degni di nota vengono analizzati e descritti di seguito.

CASO 1 (*Modello di analisi costi per il processo di Selective Laser Melting*)

È interessante un caso studio realizzato per l'azienda Leonardo [12] in cui viene sviluppato, attraverso un algoritmo, un modello matematico di analisi di costo per il processo di fabbricazione additiva PBF-LB, descritto nello schema in figura.

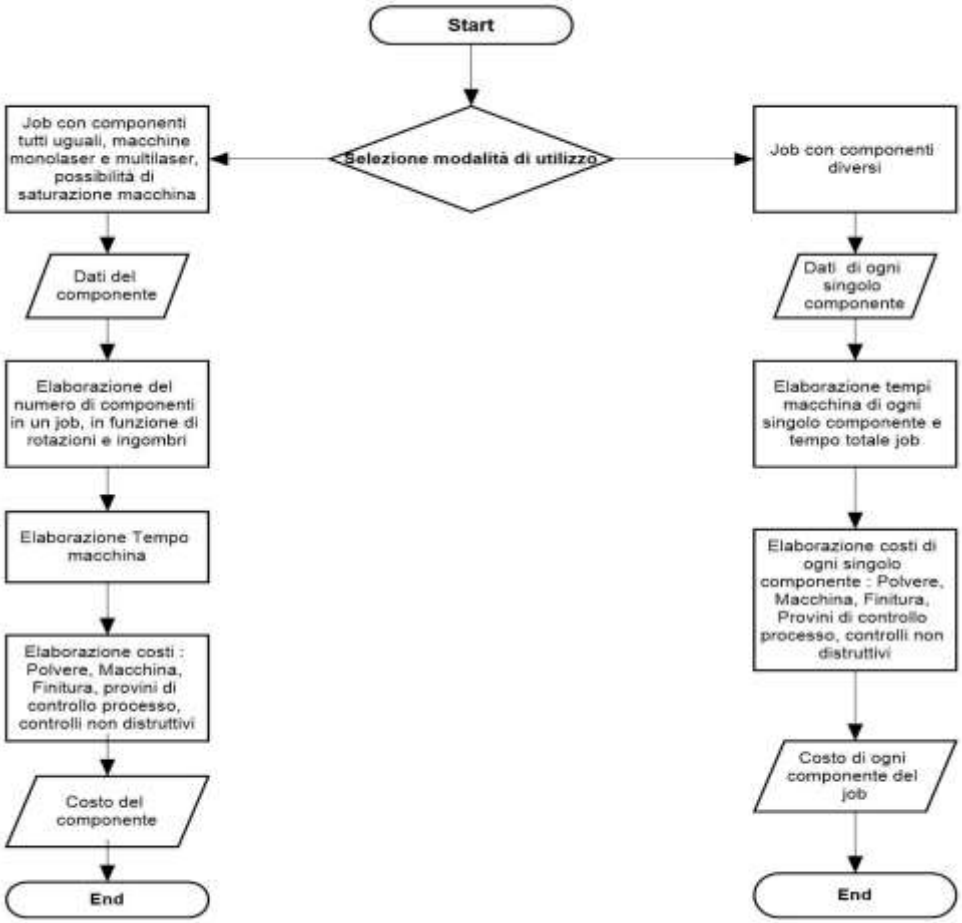


Figura 8. Architettura del software [12]

Questo software ha un duplice scopo: stimare il tempo macchina necessario per i componenti senza avere a disposizione la macchina di produzione e indipendentemente dalla sua tipologia e fornire un valore di costo che comprenda tutte le fasi necessarie per la realizzazione del componente [12]. Come si può notare dalla figura 8 il programma ha due modalità di utilizzo: la prima prevede una produzione avente componenti tutti identici, la seconda invece si basa sull'inserimento in un job di diverse tipologie di componenti. In questo modello, ai fini del calcolo dei costi sono state considerate le seguenti fasi e i costi ad esse relativi:

- Trattamento termico: considerato in funzione della grandezza del forno, della dimensione della piastra, delle dimensioni del componente, del materiale impiegato.

- Taglio dalla piattaforma di building: considerato in funzione del materiale, della velocità di taglio, delle dimensioni della piastra e del costo orario della macchina.
- Produzione: tiene conto del costo della polvere, consumo di energia elettrica e gas.
- Rimozione supporti: calcolati in funzione del materiale, della quantità di supporti e del costo orario dell'operatore.
- Preparazione della piattaforma: è stimato in funzione della tipologia di macchina, del materiale e del costo orario della lavorazione.
- Extra-processo: (finitura manuale, controllo dimensionale, controlli non distruttivi, etc.)

Alcune di queste fasi del processo verranno considerate anche nel capitolo successivo per il calcolo dell'analisi di costo relativa a questa tesi.

CASO 2 (*Metal Additive Manufacturing for the Rapid Prototyping of Shaped Parts: A Case Study)*

In quest'altro studio [23], si evidenzia invece l'importanza dell'orientamento dei componenti all'interno della camera di lavoro. Esso ha un impatto su tre aspetti: il tempo di stampa, il costo del processo e la qualità del processo in termini di deformazione.

In questo lavoro, in particolare, sono stati analizzati diversi orientamenti dei pezzi e si è scelta la soluzione migliore in termini di massima deformazione e tempo di stampa, come si può notare nella seguente tabella.

ID	Orientation angle	Max height [mm]	Supports weight [g]	Estimated 3D printing time [s]	Max deformation [mm]	User-defined Function
1	0°	47	75	36022	0.68	2.620
2	5°	43	84	39561	0.67	2.633
3	10°	55	93	42457	0.65	2.597
4	15°	66	102	47249	0.64	2.629
5	20°	76	111	51196	0.63	2.648
6	25°	87	120	54274	0.61	2.614
7	30°	97	129	57465	0.60	2.622
8	35°	107	138	59769	0.59	2.617
9	40°	116	147	61191	0.58	2.598
10	45°	124	156	62249	0.57	2.574
11	**50°**	**132**	**168**	64873	**0.55**	**2.533**
12	55°	138	180	67580	0.54	2.534
13	60°	145	175	70521	0.53	2.538
14	65°	150	170	76329	0.51	2.545
15	70°	154	165	78656	0.50	2.540

Figura 9. Report per la selezione del miglior angolo di orientamento della parte [23]

CASO 3 (*The economics of additive manufacturing: Towards a general cost model including process failure*)

Se nei primi studi l'analisi di costo si basava esclusivamente sui cosiddetti costi "*ben strutturati*", vale a dire quei costi necessari per la fabbricazione della parte, negli ultimi anni si sono estese le ricerche anche per i costi "*mal strutturati*", che includono quelli relativi all'allestimento della macchina, al cambio di produzione, ai tempi morti, agli scarti, alle non conformità e ai costi di fallimento del processo. Dove per fallimento di processo s'intende qualsiasi inconveniente che rende l'output pianificato inesistente, inutilizzabile o da correggere.

In questo studio [24] gli autori analizzano un modello di costo che tiene conto dei fallimenti del processo e applicano tale modello ad uno specifico caso del settore farmaceutico riguardante la produzione AM di farmaci a dosaggio personalizzato.

Il modello, come per altri già analizzati, si basa su un'analisi ABC e stima i tempi e i costi di ogni attività precedentemente definita. Nello specifico, il processo segue il seguente schema.

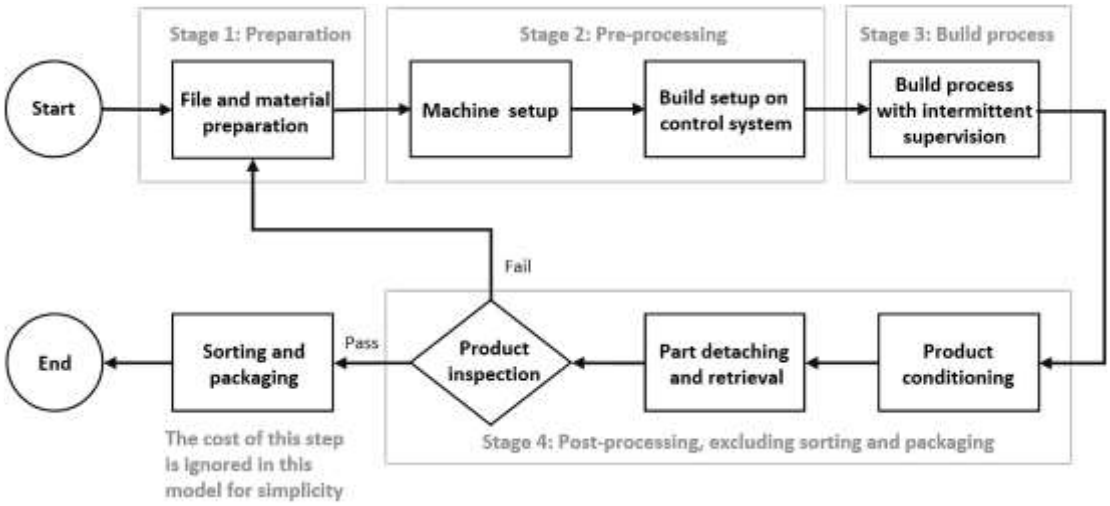


Figura 10. Schema del processo completo di realizzazione prodotto [24]

Sulla base del costo del lavoro, del materiale, dell'energia del costo del macchinario, gli autori hanno definito un costo totale di processo produttivo. A questo punto hanno introdotto un tasso di guasto (λ) necessario per calcolare la probabilità di fallimento in un qualsiasi punto del processo produttivo. Di seguito viene riportata la formula della probabilità di fallimento del processo F(t).

$$F(t)=1 - e^{\wedge} (t\times\lambda)$$

Viene definito, inoltre, un fattore di danno (D) che esprime la frazione media di unità guaste di tutte le unità contenute in processi che mostrano fallimento. Così riescono a calcolare la probabilità di guasto in una singola unità con la seguente formula.

$$F_{unità} = D \times F_{processo}$$

Riconducendo tutto in termini di costo si avrà quindi il costo totale per unità tenendo conto del possibile fallimento del processo con la seguente formula.

$$C_{unità\ (considerando\ il\ fallimento)} = C_{unità} / (1 - F_{unità})$$

L’analisi di costo che verrà effettuata in questa tesi non arriverà a questo livello di dettaglio perché l’obiettivo principale è quello di confrontare due processi produttivi dell’additive manufacturing e perché non si ha una mole di dati sufficiente per stimare i fallimenti del processo. Tuttavia, si è ritenuto opportuno inserire anche questo modello di costo per fornire un esempio di come poter dettagliare ancora meglio un’analisi di questo tipo.

3.2 SCELTA DEL MACCHINARIO IN OGNI SCENARIO E RELATIVA COSTIFICAZIONE

Dopo aver descritto come si svolgono i processi scelti (PBF-LB) e (PBF-EB) e quali sono gli elementi da tenere in considerazione in un'analisi di costo, si procede con lo studio dell'U-lock precedentemente menzionato.

È stata quindi effettuata un'analisi dei costi diretti e indiretti sul lucchetto descritto nel capitolo 2, al fine di individuare la tipologia di processo più soddisfacente e la macchina AM più conveniente in termini di costo e velocità di realizzazione. Per il processo PBF-EB/M si è scelta una macchina di medie dimensioni come l'Arcam A2X. Mentre per il processo PBF-LB/M l'individuazione del macchinario potrebbe risultare più complessa poiché sono presenti sul mercato diversi costruttori di stampanti (capitolo 3.1). Si è deciso di utilizzare come stampante per il processo PBF-LB/M la EOS M290 in quanto presenta dimensioni simili all'Arcam A2X e poiché già presente nel laboratorio del Politecnico.

È stato realizzato il progetto tridimensionale (figura 11) del componente totalmente pieno tramite il software Solidworks. Successivamente, nella stima dei costi, la spesa relativa al materiale adoperato è stata scontata di una percentuale pari al 30% per tener conto dell'effettiva struttura (reticolare) del componente.

Figura 11. Cad del nuovo lucchetto ad U (struttura piena)

Viene, quindi, effettuata una suddivisione tra costi diretti e indiretti.
Nello specifico, sono stati considerati come costi diretti tutte quelle spese correlate direttamente alla produzione del nostro bene suddividendole nelle seguenti macro-voci:

- Costo di setup
- Costo di produzione
- Costo del materiale
- Costo di post-processing

Dal calcolo dei costi diretti emerge, per entrambi i processi (PBF-LB/M e PBF-EB/M) una stima di costo per un job di produzione e quindi anche per un singolo componente. Si è stimato che il numero di pezzi presenti in un job sia uguale per entrambi i processi nonostante i macchinari utilizzati presentino caratteristiche e capacità differenti.
I costi indiretti invece includono tutte quelle spese impiegate in servizi, manutenzioni utili per il funzionamento delle attività. Sono state individuate le seguenti macro-voci di costi indiretti:

- Costo di progettazione
- Ammortamento macchinari
- Costi generali

Tali costi vengono calcolati annualmente. Il costo di progettazione si ipotizza che verrà sostenuto solo nel primo anno e non in quelli successivi.
Se i costi di ammortamento possono variare in base alla tipologia di processo poiché si utilizzano macchinari differenti aventi costi diversi, i costi generali e quelli di progettazione rimangono invariati.

I costi generali sono stati suddivisi nelle seguenti voci:

- *Costi SEO*: comprendono quei costi necessari per aumentare il livello di visibilità online.
- *Advertising*: include tutti quei costi relativi alla pubblicizzazione del prodotto sui vari media e utili quindi all'aumento progressivo delle vendite nel tempo.
- *Costo branding*; con questa voce s'intende sia il costo necessario per creare un logo per la propria azienda sia le relative spese di potenziamento e diffusione dello stesso.
- *Costo software gestionale*: la presenza di uno di questi software è indispensabile perché potrebbe garantire una corretta pianificazione della produzione oltre ad essere utile ai fini contabili (registrazione fatture, ddt,).
- *Costi commercialista*
- *Cloud e servizi IT*: comprendono costi per server, account aziendali, ma anche postazioni pc, stampanti.
- *Consulenze legali*: sono costi necessari da sostenere non soltanto per la creazione di una nuova azienda ma anche per la stipula di contratti, nuovi brevetti, controversie legali, etc.
- *Costi amministrativi*: costi del personale, cancelleria, amministrazione, etc.
- *Costo affitto locali*: si ipotizza che i locali di produzione e amministrativi siano affittati.

Quindi gli scenari analizzati sono 2:

SCENARIO	PROCESSO	MACCHINA	N° PEZZI INSERITI	DESCRIZIONE
1	PBF-EB/M	ARCAM A2X	24	I componenti vengono inseriti secondo diversi orientamenti al fine di riempire l'intero volume di lavoro.
2	PBF-LB/M	M 290	24	I componenti sono stati inseriti in posizione verticale per occupare tutto lo spazio a disposizione sulla piastra d'appoggio.

Table 16. Riepilogo scenari analizzati

La coincidenza dello stesso numero di pezzi nelle due macchine è un fattore del tutto casuale.
Di seguito si riportano i relativi costi diretti e indiretti per entrambi gli scenari.

3.2.1 SCENARIO 1: PROCESSO PBF-EB/M CON STAMPANTE ARCAM A2X

Come già accennato, nel processo Electron Beam Powder Bed Fusion, la stampante scelta è l'Arcam A2X che presenta le seguenti caratteristiche tecniche.

Figura 12. Scheda tecnica Arcam A2X

Dalla scheda tecnica del prodotto (fig. 12) in particolare sono stati estrapolati: i dati relativi alle dimensioni della camera di produzione per definire il volume massimo di costruzione di un job, e la potenza massima raggiungibile per eseguire una valutazione sui consumi energetici.

Il valore di mercato stimato per tale macchina è pari a 756.100 €, il quale è stato ammortizzato in 10 anni ed inserito nei costi indiretti.

STIMA DEL NUMERO DI PEZZI MAX PRESENTI IN UN JOB

Si è ipotizzato che l'utilizzo di questa stampante venga dedicato esclusivamente per la produzione del nostro prodotto e non per elementi differenti. Pertanto, tramite il software Solidworks è stata

costruita una camera con le stesse dimensioni della stampante in questione (200x200x380) mm e sono stati inseriti i modelli saturando l'intero volume disponibile (fig. 13-14).

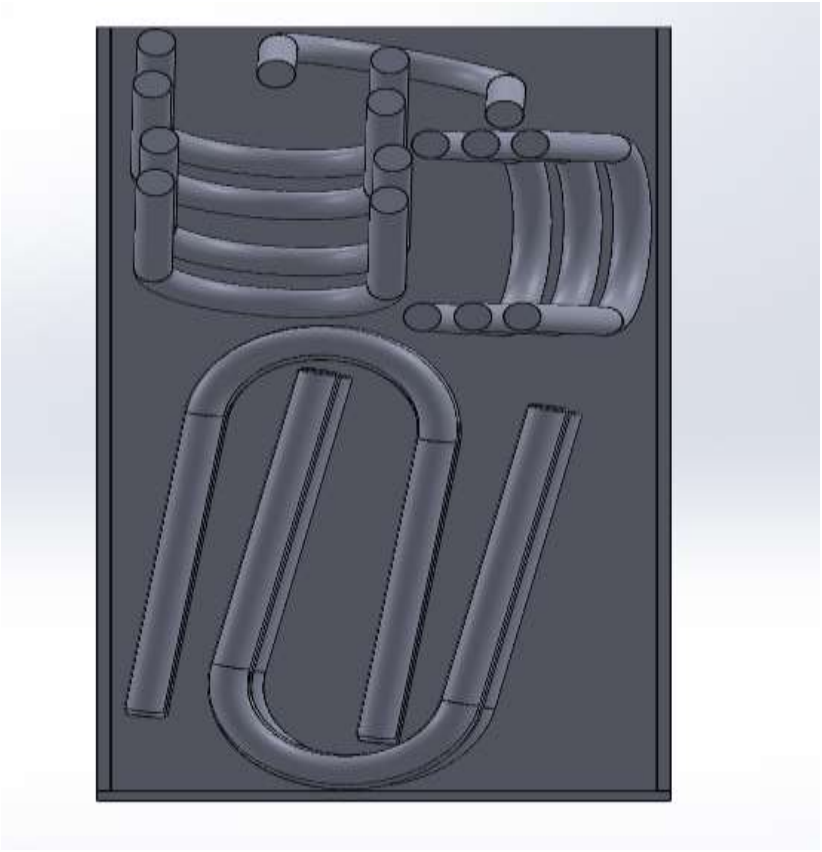


Figura 13. Disposizione lucchetti in Arcam A2x (vista frontale)

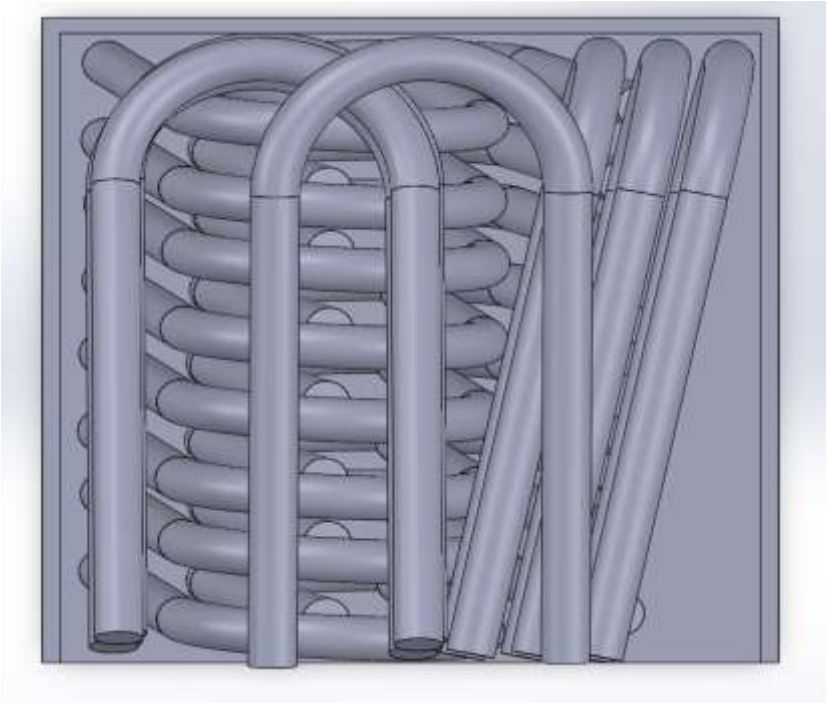


Figura 14. Disposizione lucchetti in Arcam A2X (vista dall'alto)

Nell'inserimento del numero di pezzi, come prima approssimazione, non si è tenuto conto di un orientamento specifico. Pertanto, sono stati inseriti cercando di occupare tutto lo spazio a disposizione, raggiungendo un massimo di 24 componenti.

CALCOLO COSTI DIRETTI

Se ogni componente occupa un volume pari a 66.11 cm^3 (dato ottenuto tramite il software Netfabb), il volume occupato da 24 pezzi sarà pari a 1586.64 cm^3; conoscendo il costo della polvere di Ti6Al4V si può calcolare il costo del materiale necessario per la produzione di un job e quindi anche per un singolo componente. Tale costo, come già anticipato precedentemente, viene ridotto di un 30% per tener conto della struttura reticolare.

Per la realizzazione del prodotto si è tenuto in considerazione del tempo di riempimento della polvere e setup della macchina di additive in relazione al costo orario dell'operatore.

Inoltre, il costo medio dell'energia è stato moltiplicato per il consumo medio della macchina necessario per la realizzazione del job. In questo modo è stato possibile calcolare i costi di produzione. È importante considerare che nel processo PBF-EB/M sono necessarie lunghe attese per il raffreddamento dei componenti. Ciò causa la presenza di tempi morti in fase di produzione che faranno ridurre il numero totale di pezzi realizzabili da una macchina nell'intero anno.

Il processo PBF-EB/M non richiede importanti lavorazioni di post-produzione come, ad esempio, lavorazioni di finitura superficiale o di rimozione dei supporti. È però indispensabile rimuovere tutta la polvere in eccesso che si è compattata attorno al componente. Ciò avviene grazie ad un macchinario automatico che prende il nome di Poweder Recovery Station e il cui costo è incluso nel valore della stampante e pertanto è stato stimato solo un costo relativo al setup e al consumo di energia.

Di seguito vengono riportate le tabelle realizzate in Excel per la stima dei costi diretti nel processo con fascio di elettroni.

COSTO SETUP		
Costo operatore	25	€/h
Tempo di riempimento polvere e preparazione macchina	0,6	h
COSTO PRODUZIONE		
tempo produzione	80	h
tempo di raffreddamento	10	h
costo energia	2,2	€/h
COSTO POST PROCESSING		
Costo operatore	25	€/h
Costo orario macchina PRS (recupero polvere)	20	€/h
tempo di rimozione	5	h
COSTO MATERIALE		
Costo polvere	150	€/kg
densità	4,42	g/ cm^3
Volume polvere effettivo (struttura reticolare)	1110,648	Cm^3

Table 17. Dati utilizzati per il calcolo dei costi diretti PBF-EB/M (Arcam A2X)

COSTI MACRO-VOCI		**UNITA' DI MISURA**	**VALORE IN €/pz**	**% IMPATTO COSTI DIRETTI**
Costo setup	15	€/job	0,63	2%
Costo di produzione	176	€/job	7,33	20%
Costo post-processing	225	€/job	9,38	26%
Costo materiale	736,36	€ /job	18,41	52%
TOT COSTI DIRETTI PER 1 PZ			**35,74**	**100%**

Table 18. Costi diretti processo PBF-EB/M (Arcam A2X)

Il costo per un pezzo è pari quindi a **35,74 €.**

Il tempo totale necessario per la realizzazione di un job (24pz) per il processo PBF-EB/M è pari a 90h; trattandosi di un processo completamente automatizzato si ipotizza che la stampante possa lavorare all'incirca 250 giorni all'anno e pertanto il numero complessivo di lucchetti prodotti in un anno è pari a 1600.

CALCOLO COSTI INDIRETTI

Si vuole effettuare una stima dei costi indiretti annuali che si potrebbero avere nel momento in cui si volesse intraprendere un'attività di produzione.

Come già anticipato i costi indiretti includono tre macro-voci. Di queste, quella relativa ai costi generali è stata già descritta. Le restanti due voci riguardano il costo di progettazione e il costo del macchinario di additive manufacturing: la prima voce è da considerare soltanto il primo anno mentre la seconda verrà ammortizzata in un periodo pari a dieci anni. Di seguito si riporta l'analisi completa dei costi indiretti per il processo PBF-EB/M considerando di avere una sola stampante.

COSTO PROGETTAZIONE		
Tariffa oraria ingegneri [€/h]	60	€/h
Licenza CAD [€/anno]	8000	€/anno
Licenza CAM [€/anno]	4000	€/anno
tempo di progettazione	120	h
tempo configurazione job	2	h
AMMORTAMENTO STAMPANTE		
Costo Macchina	756.100	€
numero di anni (ammortamento)	10	anni
COSTI GENERALI		
Costi SEO (ottimizzazione della ricerca online)	6000	€/anno
Advertising	30000	€/anno
Costo branding	1000	€/anno
Costo software gestionale (fatturazione)	10000	€/anno
Commercialista	2400	€/anno
Cloud e servizi IT (pc)	85	€/anno
Consulenze legali	1000	€/anno
Costi amministrativi e del personale	70000	€/anno
Costo affitto locali	20000	€/anno

Table 19. Dati utilizzati per il calcolo dei costi indiretti processo PBF-EB/M (Arcam A2X)

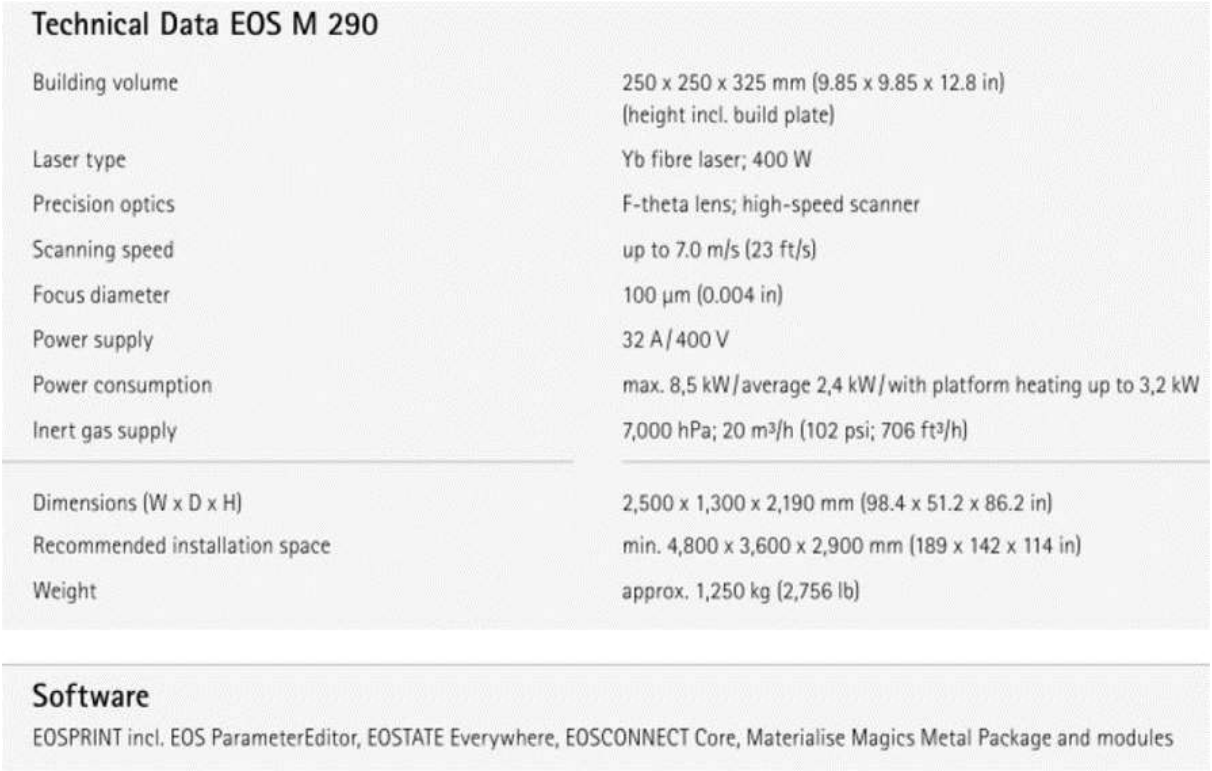
MACRO-VOCI	VALORE	UNITA' DI MISURA	% COSTI INDIRETTI
Costo progettazione	7870	€ /anno	3%
Ammortamento	75610	€/anno	34%
Costi generali totali	140485	€/anno	63%
TOT COSTI INDIRETTI	**223.965,00**	€/anno	100%

Table 20. Costi indiretti processo PBF-EB/M (Arcam A2X)

È evidente che il costo relativo alla progettazione ha un impatto trascurabile a differenza del costo del macchinario per la stampa che risulta essere una voce rilevante e che comunque varia in base al numero di macchinari che si decide di impiegare. Tuttavia, il costo maggiore è relativo alle spese generali e più nel dettaglio risultano rilevanti i costi amministrativi e di marketing.

3.2.2 SCENARIO 2: PROCESSO PBF-LB/M CON STAMPANTE M290

Per il secondo caso (processo PBF-LB/M) invece è stata scelta la stampante Eos M290 che presenta le seguenti caratteristiche tecniche.



Technical Data EOS M 290

Building volume	250 x 250 x 325 mm (9.85 x 9.85 x 12.8 in) (height incl. build plate)
Laser type	Yb fibre laser; 400 W
Precision optics	F-theta lens; high-speed scanner
Scanning speed	up to 7.0 m/s (23 ft/s)
Focus diameter	100 µm (0.004 in)
Power supply	32 A / 400 V
Power consumption	max. 8,5 kW / average 2,4 kW / with platform heating up to 3,2 kW
Inert gas supply	7,000 hPa; 20 m³/h (102 psi; 706 ft³/h)
Dimensions (W x D x H)	2,500 x 1,300 x 2,190 mm (98.4 x 51.2 x 86.2 in)
Recommended installation space	min. 4,800 x 3,600 x 2,900 mm (189 x 142 x 114 in)
Weight	approx. 1,250 kg (2,756 lb)

Software

EOSPRINT incl. EOS ParameterEditor, EOSTATE Everywhere, EOSCONNECT Core, Materialise Magics Metal Package and modules

Figura 15. Scheda tecnica EOS M290

Analogamente al processo PBF-EB/M anche in questo caso, dalla scheda tecnica della stampante sono stati estrapolati i dati relativi alle dimensioni della camera di produzione per definire il volume massimo di costruzione di un job, e la potenza media raggiungibile per eseguire una valutazione sui consumi energetici.

Il valore di mercato stimato per tale macchina è pari a 718.833 €, il quale verrà poi ammortizzato in 10 anni per la stima dei costi indiretti.

STIMA DEL NUMERO DI PEZZI MAX PRESENTI IN UN JOB

Sono stati inseriti i modelli nel software Netfabb predisponendo la stampante sopra individuata. Si è scelta la configurazione che permettesse di riempire in maniera ottimale la macchina e che impiegasse il minor quantitativo di supporti possibili. Il numero di pezzi inserito risulta pari a 24.

Inoltre, è bene sottolineare che è stata saturata tutta la superficie di lavoro e non il volume complessivo come nel caso PBF-EB/M.

Di seguito si può visualizzare la disposizione scelta per il processo.

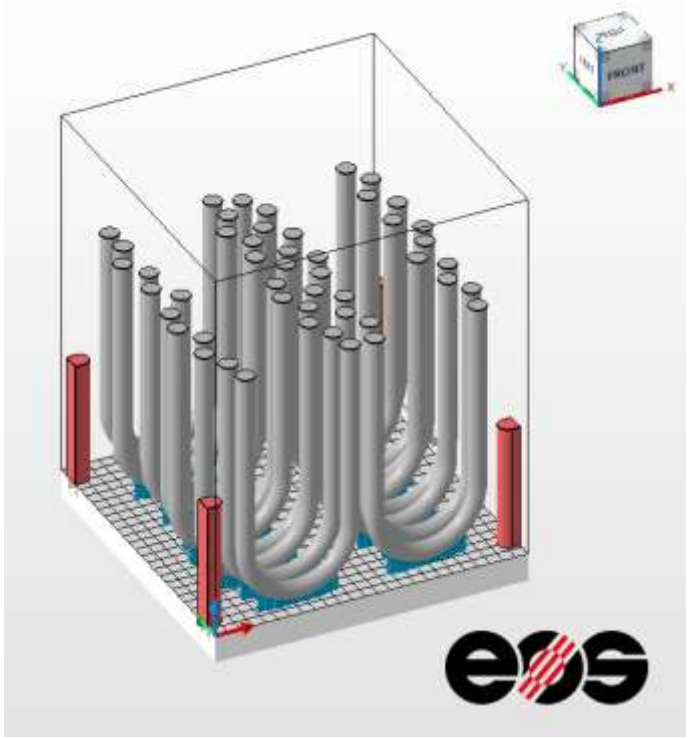


Figura 16. Disposizione lucchetti in M290 (vista di profilo)

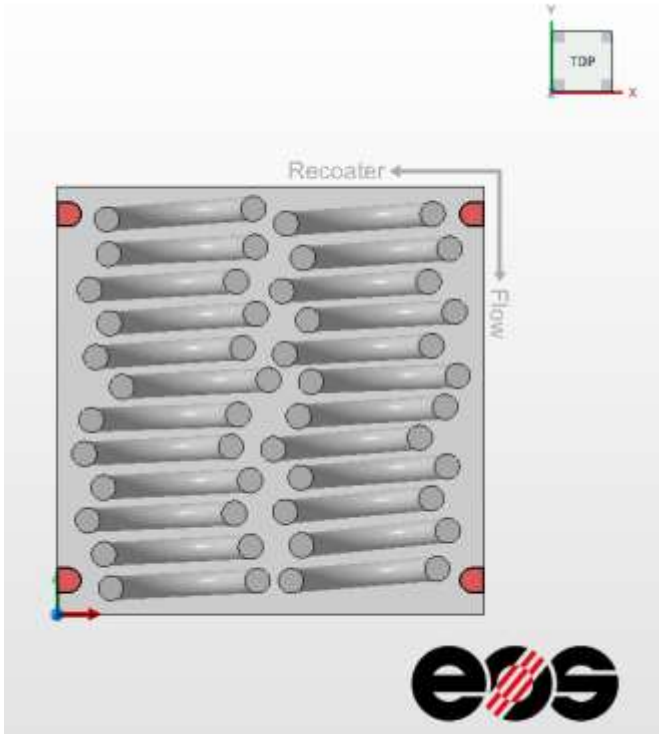


Figura 17. Disposizione lucchetti in M290 (vista dall'alto)

CALCOLO COSTI DIRETTI

Il volume totale occupato dai 24 pezzi (inclusi i supporti) è pari a 1611,37 cm^3, togliendo il 30% perché trattasi di una struttura reticolare il volume totale effettivo del job risulta pari a 1127,959. Conoscendo il costo della polvere di Ti6Al4V, si può calcolare anche in questo caso il costo del materiale necessario per la produzione di un job e quindi anche per un singolo componente.

Per la realizzazione del prodotto si è tenuto conto del tempo di riempimento della polvere e setup della macchina di additive in relazione al costo orario dell'operatore. Al quale si è aggiunto anche il costo relativo alla rettifica della piattaforma.

Invece, in fase di produzione è stato considerato il costo dell'energia calcolato come per il caso EBM. In questo processo si aggiunge l'utilizzo del gas argon, che impedisce l'ossidazione del materiale ed evita la possibilità di innesco di incendio. Il costo relativo al consumo di argon è pari a 3,75 €/h.

Nella fase di post-processing invece è stato considerato un costo di trattamento termico, necessario per l'eliminazione delle tensioni interne indotte dal processo di costruzione, il costo per la rimozione dei supporti e il costo di pallinatura, processo necessario per la rimozione completa della polvere.

COSTO SETUP		
Costo operatore	25	€/h
Tempo di riempimento polvere e preparazione macchina	0,6	h
Costo di rettifica della piattaforma	18,45	€
COSTO PRODUZIONE		
tempo produzione	40	h
costo energia	0,528	€/h
Costo gas	3,75	€/h
COSTO POST PROCESSING		
Costo operatore	25	€/h
Tempo di rimozione supporti	2	h
Costo trattamento termico	110	€/h
Tempo trattamento termico	2	h
Costo rimozione polvere	15	€/h
Tempo rimozione polvere	3	h
COSTO MATERIALE		
Costo polvere	330	€/kg
densità	4,42	g/ cm^3
Volume polvere totale per U-lock con struttura reticolare	1127,95	Cm^3

Table 21. Dati utilizzati per il calcolo dei costi diretti (processo PBF-LB/M)

MACRO-VOCI		UNITA' DI MISURA	VALORE IN €/pz	% IMPATTO COSTI DIRETTI
Costo setup	33,45	€/job	1,39	2%
Costo di produzione	171,12	€/job	7,13	11%
Costo post-processing	430,00	€/job	17,92	27%
Costo materiale	1645,24	€ /job	41,13	61%
TOT COSTI DIRETTI (1PZ)			**67,57**	100%

Table 22. Costi diretti per processo PBF-LB/M

Dalle tabelle si può notare che la percentuale più alta di costi diretti è allocata al post-processing e al costo del materiale; a seguire si evidenzia il costo di produzione e quello di setup, quasi trascurabili.

Il costo totale necessario per la produzione di un pezzo è pari a **67,57 €**.

CALCOLO COSTI INDIRETTI

Come già effettuato per il processo PBF-EB/M anche per quello PBF-LB/M effettuiamo una stima dei costi indiretti. Rispetto al caso precedente rimane tutto invariato ad eccezione del costo della stampante pari a 718.833€ (ammortizzabile in un periodo di 10anni).

COSTO PROGETTAZIONE		
Tariffa oraria ingegneri [€/h]	60	€/h
Licenza CAD [€/anno]	8000	€/anno
Licenza CAM [€/anno]	4000	€/anno
tempo di progettazione	120	h
tempo configurazione job	2	h
AMMORTAMENTO STAMPANTE		
Costo Macchina	718.833	€
numero di anni (ammortamento)	10	anni
COSTI GENERALI		
Costi SEO (ottimizzazione della ricerca online)	6000	€/anno
Advertising	30000	€/anno
Costo branding	1000	€/anno
Costo brevetto		€/anno
Costo software gestionale (fatturazione)	10000	€/anno
Commercialista	2400	€/anno
Cloud e servizi IT (pc)	85	€/anno
Consulenze legali	1000	€/anno
Costi amministrativi	70000	€/anno
Costo affitto locali	20000	€/anno

Table 23. Dati utilizzati per il calcolo dei costi indiretti (processo PBF-LB/M)

MACRO-VOCI	VALORE	UNITA' DI MISURA	% COSTI INDIRETTI
Costo progettazione	7870	€ /anno	3%
Ammortamento	71883	€/anno	33%
Costi generali totali	140485	€/anno	64%
TOT COSTI INDIRETTI	**220.238**	€/anno	100%

Table 24. Costi indiretti processo PBF-LB/M

Anche in questo caso il costo maggiore è relativo alle spese generali e più nel dettaglio risultano rilevanti i costi amministrativi e di marketing.

4. ANALISI DEL MERCATO DI LUCCHETTI PER BICI E INDIVIDUAZIONE DEL BREAK-EVEN-POINT

Attualmente i lucchetti per bici sono ampiamente utilizzati per preservare e proteggere il proprio mezzo di trasporto da eventuali malfattori. Ci sono alcuni elementi importanti da tenere in considerazione nel momento in cui si vuole acquistare un lucchetto per bici. Primo fra tutti è la *resistenza,* il lucchetto in questione deve essere in grado di resistere alla forza combinata di taglio e di compressione generata da un utensile, come una tronchese, in grado di rompere questi dispositivi. Però è evidente che si viene a generare un trade-off tra resistenza e *leggerezza* poiché tali lucchetti oltre ad essere solidi e robusti devono avere un peso ridotto e occupare il minor spazio possibile per essere facili da trasportare. Per risolvere in parte questo trade-off si punta molto sulla deterrenza visiva; a tal proposito è importante che un antifurto appaia solido, vistoso e indistruttibile al fine di scoraggiare i malintenzionati. Un ultimo elemento da tenere in considerazione è la *praticità* e la *facilità di utilizzo*; si deve essere in grado di aprire e chiudere il dispositivo senza impiegare troppo tempo e senza dover effettuare manovre complicate.

Sul mercato esistono diverse tipologie di lucchetti per bici [25]:

- Il **cavo in acciaio** che può presentare all'estremità due asole oppure una chiusura a combinazione o una chiusura con chiave. Questa tipologia in genere è abbastanza economica e ampiamente diffusa.

- Il **catenaccio** è una comune catena formata da anelli in acciaio rivestiti da un involucro di plastica dotata all'estremità di una chiusura con lucchetto.

- **Catenaccio con maglie quadre** simile a quello precedente ma ancora più robusto e resistente grazie ai suoi anelli quadri rivestiti da un tessuto.

- **U-lock** è un antifurto in acciaio a forma di U. È molto resistente e in genere è uno dei lucchetti più utilizzati per bici abbastanza costose.

- Lo **Snake** è un antifurto pieghevole costituito da lamine in acciaio legate tra loro per mezzo di snodi. Quest'ultimi, pur avendo una buona funzionalità perché permettono al lucchetto di richiudersi e di occupare uno spazio ridotto nel momento di non utilizzo, rappresentano il punto debole della struttura in caso di scasso.

- Il **blocca disco,** può essere utilizzato solo su bici dotate di freno a disco ed è formato da un corpo in acciaio temprato, dotato di una serratura a chiave.

Figura 18. Cavo in acciaio

Figura 19. Catenaccio

Figura 20. Catenaccio a maglie quadre

Figura 21. U-lock

Figura 22. Snake

Figura 23. Blocca disco

Oltre a tutte le caratteristiche tecniche elencate precedentemente è importante che il lucchetto abbia un rapporto qualità prezzo conveniente. Solitamente il budget da dedicare all'acquisto del proprio antifurto viene calcolato prendendo il costo totale della bicicletta e dividendolo per dieci [25].

Ecco allora di seguito i marchi più conosciuti a livello internazionale di lucchetti per bici.

ABUS

Questa azienda tedesca, leader del settore, è stata fondata nel 1924 e da allora si è diffusa ampiamente in tutto il mondo concentrandosi nella creazione di soluzioni per la sicurezza. Per soddisfare la continua crescita del settore privato, ABUS propone un'ampia gamma di prodotti innovativi e tecnologicamente avanzati come lucchetti ad arco e lucchetti con cavo rinforzato.

Entrando più nel dettaglio, tra le principali tipologie di antifurto sono presenti gli antifurto a cavo, molto leggeri e flessibili, l'antifurto ad arco, l'antifurto da telaio, l'antifurto pieghevole, i cavi a spirale, le catene con chiusura, e i sistemi di ancoraggio a terra e a parete [26].

L'ultima opzione proposta da ABUS si chiama Nutfix ed è un piccolo dado che protegge dai furti le ruote, il canotto e il sellino delle biciclette.

Figura 24. Lucchetto Nutfix [26]

ABUS propone anche una serie di accessori correlati, sia per fissare gli antifurti, sia per la sicurezza generale del ciclista, garantendo qualità ed affidabilità nel mondo delle due ruote.
Alcuni prodotti raggiungono costi anche abbastanza elevati, ma le prestazioni sono notevoli.

KRYPTONITE

Da oltre quarant'anni questa azienda è specializzata nella produzione di soluzioni per la sicurezza delle biciclette. Kryptonite propone una vasta gamma di prodotti: i lucchetti antifurto ad U, i cavetti flessibili in acciaio intrecciato con occhielli, la catena cementata con lucchetto antitaglio, l'antifurto flessibile lamellare ad alta sicurezza, un kit per la personalizzazione del proprio antifurto e molte altre proposte [27]. Tra queste viene citata l'assicurazione aggiuntiva in caso di furto della bici chiamata ATPO (Anti-Theft Protection Offer) che viene offerta da Kryptonite. Se la bicicletta viene rubata a causa della rottura violenta o della apertura del lucchetto, l'azienda si impegna a pagare il costo base della bicicletta. ATPO è disponibile per tutti i clienti che acquistano lucchetti ad U e catene nei seguenti paesi: Austria, Belgio, Bulgaria, Canada, Croazia, Danimarca, Finlandia, Francia, Germania, Grecia, Ungheria, Islanda, Irlanda, Israele, Italia, Lettonia, Lituania, Lussemburgo, Paesi Bassi, Norvegia, Polonia, Portogallo, Romania, Slovenia, Spagna, Svezia, Svizzera, Regno Unito e Stati Uniti [28].

I suoi prodotti possiedono uno spessore che impedisce la rottura con le tronchesi e sono realizzati con materiali di qualità come l'acciaio temprato. Le catene sono realizzate con maglia a sei facce e sono tra le più resistenti in commercio.

Esistono diverse fasce di prezzo e alcuni prodotti Kryptonite raggiungono prezzi anche sopra la media. Tuttavia, si è riscontrato che il loro peso è maggiore di quello medio arrivando a pesare anche 2kg e risultando così ingombranti e difficili da trasportare.

ONGUARD

L'azienda americana Onguard è considerata uno dei migliori marchi di antifurto per bici e propone una serie di prodotti altamente specializzati ad un prezzo molto conveniente. Una delle principali

proposte sono i lucchetti a catena. Ogni prodotto è molto apprezzato dai ciclisti di tutto il mondo per il design ultraleggero e allo stesso tempo molto resistente.

Tra le tipologie di prodotti si possono distinguere tre macro-aeree: il livello di sicurezza standard, il livello di sicurezza alta e il livello di sicurezza massima. Questa classificazione permette di scegliere più facilmente il tipo di antifurto più adatto alle proprie esigenze e al budget.

Il marchio offre diverse tipologie di garanzia, tra cui la garanzia a vita e altri programmi contro i furti. L'azienda esporta in tutto il mondo grazie alla sua fitta rete di rivenditori sparsi in ogni Paese.

B'TWIN

È un'azienda francese specializzata nel campo delle due ruote dal 1976. Nata come marchio di produzione di biciclette, nel corso degli anni fino ha sviluppato anche linee di prodotti e accessori correlati, come abbigliamento, antifurto, zaini e borse. B'TWIN è conosciuto grazie alla capillarità dei negozi Decathlon, rete di vendita dedicata a tutti i prodotti del marchio [29].

Offre ai propri clienti la garanzia denominata "soddisfatti o rimborsati", con la quale garantisce sicurezza e qualità in tutti i negozi Decathlon. Il marchio B'SECURE invece permette di valutare l'efficacia dei suoi antifurti. B'SECURE è un protocollo elaborato insieme al Centro Nazionale di Prevenzione e Protezione che valuta su una scala x/10 la sicurezza di ogni tipo di antifurto. In questo modo i ciclisti possono scegliere il prodotto più idoneo al proprio mezzo e alle proprie esigenze. Anche se la gamma di prodotti B'TWIN è maggiormente ridotta rispetto ad altre aziende, tutti gli antifurto sono ideati secondo i principi della flessibilità, della facilità di trasporto e della resistenza. I prodotti B'TWIN sono generalmente più economici rispetto ai prodotti dei competitor con prezzi che vanno da un minimo di 15 euro fino a circa 30 euro, contrariamente ad alcuni concorrenti che vendono alcuni modelli di antifurto per bici superando ampiamente i 100 euro. Tra le tipologie di antifurto disponibili si trovano i lucchetti a cavo, gli U-lock e le catene.

TRELOCK

Trelock offre un'ampia scelta di lucchetti ad arco, pieghevoli e a catena per mettere al sicuro la bicicletta. Le principali caratteristiche di un lucchetto di qualità sono la forma arrotondata del corpo, la protezione posteriore del barilotto, l'asta rotante antitaglio e l'impugnatura dell'asta a rottura programmata [30]. Inoltre, come in tutti i sistemi di chiusura, anche nei lucchetti la serratura è uno degli elementi fondamentali: profili a "doppia T" o a "fungo" fanno sì che nonostante l'azione del grimaldello, i contro pistoncini tendano a rimanere incastrati nelle loro sedi, rendendo molto difficile il movimento.

MASTER LOCK

Master Lock fu fondata da Harry Soref nel 1921. La produzione di lucchetti laminati di Master Lock ha inizio in una singola stanza, in un piccolo edificio commerciale a Milwaukee, nel Wisconsin.
È un'azienda diffusa in tutto il mondo con sedi in Germania, Spagna e Regno Unito. Realizza lucchetti per bici e veicoli in generale, ma mette in risalto prodotti relativi alla sicurezza della casa [31].
Master Lock possiede 7500 impiegati e nel 2021 ha prodotto un fatturato pari a 860 milioni $.

LOWE & FLETCHER

L'azienda venne fondata nel 1889, attualmente presenta siti operativi in Regno Unito, Belgio, Francia, Germania, Polonia e Stati Uniti. È un'azienda specializzata nella realizzazione di serrature per mobili, porte, casseforti ed è altamente specializzata anche nella realizzazione di lucchetti. Infatti, presenta una vasta gamma di prodotti per bici, autoveicoli, moto, etc.

ANALISI DI PREZZO

Dopo aver individuato i maggiori produttori di U-lock sul mercato è stata effettuata un'analisi dei prezzi dei vari articoli disponibili come mostrato nella seguente tabella.

Numero	PRODUTTORE	Articolo	prezzo	livello di sicurezza
1	Abus	Facilo 32	30,00 €	7/15
2		Granit 460	60,00 €	9/15
3		U 435	60,00 €	nd
4		Granit X Plus 540	108,13 €	15/15
5		ABUS Ultimate 420 Antifurto a U con ZB 401	64,00 €	12/15
6	Kryptonite	Evolution 11-14	69,00 €	7/10
7		Kryptolok standard	54,38 €	6/10
8		Evolution mini 7	68,20 €	7/10
9		New York Lock Fahgettaboudit 15.2 cm	144,50 €	9/10
10		Kryptonite Antifurto U New York U-Lock M18-	136,83 €	9/10
11	Onguard	Brute	79,95 €	95/100
12		Pitbull	54,95 €	80/100
13		Bulldog	37,95 €	65/100
14		Bulldog combo	37,95 €	65/100
15	BTWIN/ELOPS	920 U	33,99 €	8/10
16		U 900	33,99 €	8/10
17		U 500	14,99 €	4/10
18	TreLock	U6 108-230 ZB 401 STANDARD	89,99 €	17/18
19		U6 108-300 ZB 401 LONG SHACKLE	92,99 €	17/18
20		U5 MINI FLEX 83-178 ZB 401	76,99 €	15/18
21		U5 MINI 83-148 ZB 401	70,99 €	15/18
22		U4 PLUS 108-230 ZB 401	64,99 €	14/18
23		U4 102-230 ZB 401	53,99 €	13/18
24		U4 MINI 83-152 ZB 401	42,99 €	12/18
25		U4 FLEX 102-230 ZB 401	59,99 €	13/18
26	MASTER LOCK	8170EURODPRO	14,90 €	5/10
27		8170D	24,90 €	
28		8195EURDPR	33,00 €	10/15
29		8320D	176,61 €	
30		8285EURDPRO	39,50 €	10/15
31		8279EURDPRO	38,90 €	12/15
32		8274EURDPRO	35,95 €	nd

Table 25. Sintesi prezzi dei principali competitor

Il prezzo medio dei lucchetti per bici è pari a 62,67€, il prezzo massimo e quello minimo invece sono pari rispettivamente a 176.61€ e 14.90€.

Al fine di individuare un prezzo competitivo sul mercato per il nostro prodotto è stata rielaborata la tabella 25 raggruppando i lucchetti in base al livello di sicurezza.

Articolo	Prezzo	Livello di sicurezza	Prezzo medio	Prezzo min	Prezzo max
U 500	14,99 €	0,40			
Facilo 32	30,00 €	0,47			
8170EURODPRO	14,90 €	0,50	24,15 €	14,90 €	35,95 €
8170D	24,90 €	<0,6			
8274EURDPRO	35,95 €	<0,3			
Kryptolok standard	54,38 €	0,60			
Granit 460	60,00 €	0,60			
Bulldog	37,95 €	0,65			
Bulldog combo	37,95 €	0,65			
8195EURDPR	33,00 €	0,67			
8285EURDPRO	39,50 €	0,67			
U4 MINI 83-152 ZB 401	42,99 €	0,67	52,46 €	33,00 €	69,00 €
Evolution mini 7	68,20 €	0,70			
Evolution 11-14	69,00 €	0,70			
U4 102-230 ZB 401	53,99 €	0,72			
U4 FLEX 102-230 ZB 401	59,99 €	0,72			
U4 PLUS 108-230 ZB 401	64,99 €	0,78			
U 435	60,00 €	0,6>x<0,8			
920 U	33,99 €	0,80			
U 900	33,99 €	0,80			
8279EURDPRO	38,90 €	0,80			
Pitbull	54,95 €	0,80			
ABUS Ultimate 420 Antifurto a U con ZB 401	64,00 €	0,80			
U5 MINI 83-148 ZB 401	70,99 €	0,83			
U5 MINI FLEX 83-178 ZB 401	76,99 €	0,83			
New York U-Lock M18-WL 10,2 x 26,1 cm	136,83 €	0,90	85,92 €	33,99 €	176,61 €
New York Lock Fahgettaboudit 15.2 cm	144,50 €	0,90			
U6 108-230 ZB 401 STANDARD	89,99 €	0,94			
U6 108-300 ZB 401 LONG SHACKLE	92,99 €	0,94			
Brute	79,95 €	0,95			
Granit X Plus 540	108,13 €	1,00			
8320D	176,61 €	0,8>x<1			

Table 26. Analisi di prezzo dei lucchetti con raggruppamento per livello di sicurezza

Quindi, sono state individuate tre categorie. La prima ha un livello di sicurezza compreso tra 0,4-0,6 e presenta un prezzo medio pari a 24,15€. Il prezzo medio della seconda è pari a 52,46 € e raggruppa i lucchetti con un livello di sicurezza compreso tra 0,6-0,8. Infine, per l'ultimo range (0,8-1) il prezzo medio è pari a 85,92 €.

Tale analisi risulta utile per l'individuazione del Break-even point nei i due scenari individuati per il lucchetto in questione.

PUNTO DI BREAK-EVEN PER LO SCENARIO 1 (PBF-EB/M)

Il break even point (o punto di pareggio) rappresenta il punto in cui i ricavi dovuti alle vendite eguagliano i costi aziendali, al di sopra di tale punto si verificherà un profitto.

I costi generali e quelli dovuti all'ammortamento dei macchinari sono stati classificati come costi fissi, mentre i costi associati alla produzione diretta del pezzo come costi variabili. Quest'ultimo costo risulta pertanto essere pari a 35,74€ (capitolo 3.2.1).

Si è deciso di partire dalla scelta del prezzo per individuare successivamente il numero minimo di prodotti da vendere per ottenere profitti.
A tal proposito, si ipotizza che il nostro prodotto si collochi in una fascia di lucchetti con alti livelli di prestazione in termini di sicurezza; dall'analisi sui prezzi dei competitor, appena effettuata, il prezzo minimo (per la fascia di lucchetti con alte prestazioni) risulta essere 33,99€, quello massimo 176,61€ e quello medio pari a 85,92€. Considerando che il nostro prodotto potrebbe avere una buona appetibilità sul mercato grazie alla sua struttura innovativa che garantisce buone prestazioni in termini di resistenza, e una buona praticità d'uso grazie al peso ridotto (il lucchetto da immettere sul mercato potrebbe pesare circa la metà di quelli attualmente presenti) si potrebbe scegliere un prezzo leggermente superiore a quello medio. Si è quindi scelto un prezzo di vendita pari a 92€.
Con tale prezzo si è deciso di individuare il BEP (Break-Even Point) visualizzabile nel seguente grafico.

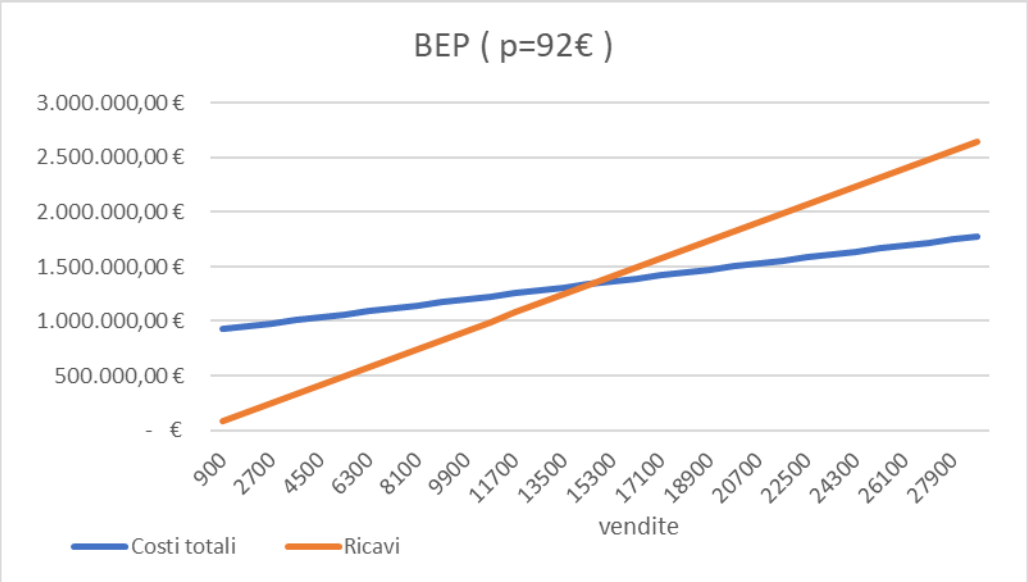


Figura 25. Valore di Break even per processo EBM

Il valore di break-even risulta pari 15.938 pezzi, per i quali sono necessarie 10 stampanti Arcam A2X. Per il calcolo si è tenuto conto che una stampante può produrre all'anno al massimo 1600 pezzi. È importante ricordare che il modello di Horngren (autore del BEP) presenta comunque dei limiti e che il valore ottenuto è da utilizzare prevalentemente per un confronto con il processo SLM (per il quale verrà effettuato il calcolo sotto le stesse condizioni). Infatti, nel modello del break even point si ipotizza che il prezzo rimanga costante e che i costi fissi non varino; tale situazione è attribuibile ad un periodo temporale molto ristretto.

Per avere quindi un maggiore dettaglio di quelli che potrebbero essere i costi e i ricavi in un periodo temporale più lungo si è deciso di effettuare un'analisi del conto economico.

ANALISI CONTO ECONOMICO SCENARIO 1 (PBF-EB/M)

Si vuole creare un conto economico previsionale stimando le entrate future, gli utili e le perdite. Esso viene utilizzato per assicurarsi che vi sia un fatturato che garantisca un guadagno sufficiente a coprire i costi sostenuti, e per determinare il punto di pareggio in un periodo di tempo pari a 12 anni. Si ipotizza quindi che al primo anno l'azienda inizi a produrre U-lock (caratterizzati dalla struttura innovativa precedentemente descritta) e che venda il proprio prodotto sia sul mercato nazionale (Italia), probabilmente nella fase iniziale, e successivamente in quello Europeo. A tal proposito, estrapoliamo dalla tesi di P. Maltese la stima delle vendite totali di lucchetti per bici in Europa (pari a 20.680). Dopo aver estrapolato anche il CAGR del settore (+ 6%), si suppone che le vendite relative al mercato europeo possano crescere fino al dodicesimo anno. A questo punto si ipotizza di partire con un numero di vendite pari a 2000 pz e dopo aver supposto che la quota di mercato dell'azienda in questione cresca di un +20% all'anno si stimano le vendite che si potrebbero effettuare nel corso degli anni.

Come per il calcolo del break-even anche in questo caso si sceglie un prezzo di vendita pari a 92€/pz e trattandosi di un'impresa produttiva si sceglie un'analisi del conto economico secondo una riclassificazione al costo del venduto. Pertanto, alcuni costi indiretti come gli ammortamenti dei macchinari, il costo di progettazione, il costo di SEO, i costi di advertising e del brand vengono imputati direttamente alla realizzazione del prodotto. Il costo degli operatori che intervengono nel processo produttivo è incluso già nei costi diretti, mentre il costo della restante parte del personale è nella omonima voce appartenente ai costi indiretti.
Al fine di includere nell'analisi la presenza di eventuali tasse si è scelta un'aliquota fiscale pari al 5% per i primi 5 anni e pari al 24% (valore IRES) per i successivi. È bene precisare che si è deciso di mantenere i costi relativi al marketing costanti nel tempo.

Anni	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Vendite totali mercato Europeo (pz)	20.680.000	21.920.800	23.236.048	24.630.211	26.108.024	27.674.505	29.334.975	31.095.074	32.960.778	34.938.425	37.034.730	37.034.730
Quota di mercato	0,01%	0,012%	0,014%	0,017%	0,020%	0,024%	0,029%	0,035%	0,042%	0,050%	0,060%	0,072%
Vendite di lucchetti (pz)	2.000	2.544	3.236	4.116	5.235	6.659	8.470	10.774	13.705	17.433	22.174	26.609
Ricavi	183.978	234.019	297.673	378.640	481.630	612.633	779.269	991.230	1.260.845	1.603.795	2.040.027	2.448.033
Costi tot diretti	71.476	90.917	115.647	147.103	187.115	238.010	302.749	385.097	489.843	623.080	792.558	951.069
Costo progettazione	7.870											
Costi SEO (ottimizzazione della ricerca online)	6000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000
Advertising	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000
Costo branding	1000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Ammortamento stampante 1	75.610	75.610	75.610	75.610	75.610	75.610	75.610	75.610	75.610	75.610		
Ammortamento stampante 2	75.610	75.610	75.610	75.610	75.610	75.610	75.610	75.610	75.610	75.610		
Ammortamento stampante 3			75.610	75.610	75.610	75.610	75.610	75.610	75.610	75.610	75.610	75.610
Ammortamento stampante 4					75.610	75.610	75.610	75.610	75.610	75.610	75.610	75.610
Ammortamento stampante 5						75.610	75.610	75.610	75.610	75.610	75.610	75.610
Ammortamento stampante 6							75.610	75.610	75.610	75.610	75.610	75.610
Ammortamento stampante 7								75.610	75.610	75.610	75.610	75.610
Ammortamento stampante 8									75.610	75.610	75.610	75.610
Ammortamento stampante 9									75.610	75.610	75.610	75.610
Ammortamento stampante 10										75.610	75.610	75.610
Ammortamento stampante 11										75.610	75.610	75.610
Ammortamento stampante 12											75.610	75.610
Ammortamento stampante 13											75.610	75.610
Ammortamento stampante 14											75.610	75.610
Ammortamento stampante 15												75.610
Ammortamento stampante 16												75.610
Ammortamento stampante 17												75.610
MARGINE LORDO INDUSTRIALE	**- 83.588**	**- 45.118**	**- 81.804**	**- 32.293**	**- 44.925**	**- 40.427**	**- 14.140**	**39.864**	**53.512**	**112.005**	**303.149**	**325.813**
Costo software gestionale (fatturazione)	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000
Commercialista	2.400	2.400	2.400	2.400	2.400	2.400	2.400	2.400	2.400	2.400	2.400	2.400
Cloud e servizi IT (pc)	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85
Consulenze legali	1000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Costi amministrativi e del personale	70000	70.000	70.000	70.000	70.000	70.000	70.000	70.000	70.000	70.000	70.000	70.000
Costo affitto locali	20000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000
EBIT	**- 187.073**	**- 148.603**	**- 185.289**	**- 135.778**	**- 148.410**	**- 143.912**	**- 117.625**	**- 63.621**	**- 49.973**	**8.520**	**199.664**	**222.328**
Tasse	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2045	47919	53359
UTILE DI ESERCIZIO	**- 187.073**	**- 148.603**	**- 185.289**	**- 135.778**	**- 148.410**	**- 143.912**	**- 117.625**	**- 63.621**	**- 49.973**	**6.475**	**151.745**	**168.970**

Table 27. Conto economico processo PBF-EB/M

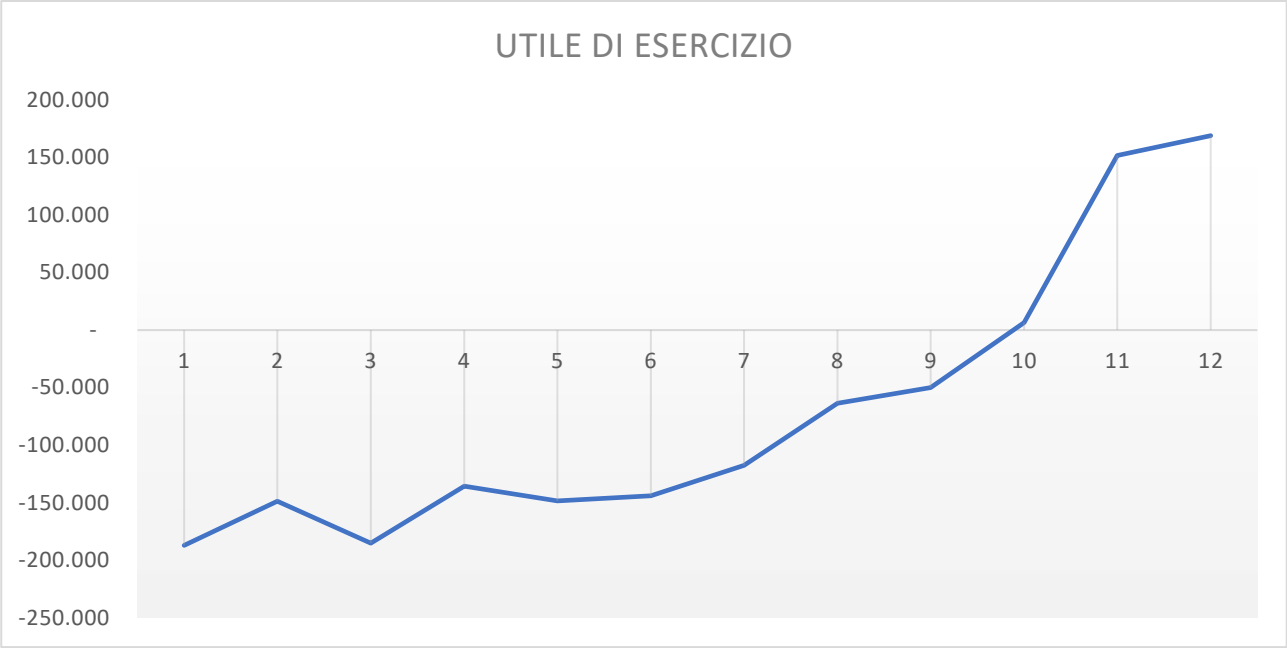


Figura 26. Andamento utile di esercizio per il processo PBF-EB/M

Dall'andamento dell'utile di esercizio e dall'analisi del conto economico si può notare che si ha un ritorno a partire dal decimo anno grazie all'impiego di 11 stampanti e che in 12 anni si deve invece investire in circa 17 stampanti per fronteggiare l'aumento di domanda. È evidente che con questo processo il raggiungimento di un utile positivo non si ottiene sicuramente nel breve periodo e gli investimenti in termini di macchinari sono consistenti.

PUNTO DI BREAK-EVEN SCENARIO 2 (PBF-LB/M)

Analogamente al calcolo per il primo scenario, si vuole individuare il punto di break-even con il processo PBF-LB/M considerando anche in questo caso un prezzo di vendita pari a 92 €.

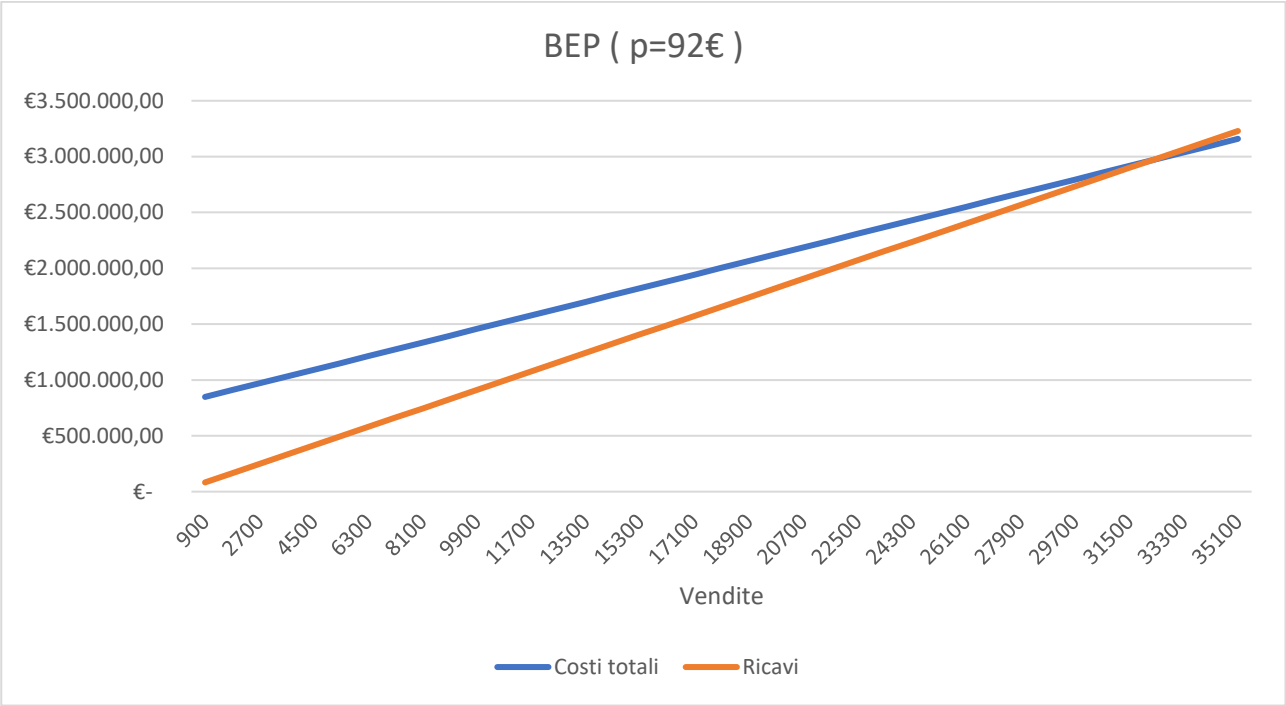


Figura 27. Valore di Break even per processo LPBF

Come si può notare dal grafico il punto di pareggio risulta pari a 32.234 pezzi. Tale valore risulta essere maggiore di quello individuato per il processo PBF-EB/M, probabilmente a incidere sono i costi variabili nettamente superiori.

ANALISI CONTO ECONOMICO SCENARIO 2 (PBF-LB/M)

Infine, è bene effettuare l'analisi del conto economico basandoci sulle stesse condizioni dello scenario precedente che elenchiamo di seguito:

- Prezzo di vendita = 92,00€
- Numero vendite al primo anno = 2000pz
- Vendite totali nel mercato Europeo di lucchetti nel 2022= 20.680.000
- CAGR = +0.6%
- Tasso di crescita annuale della quota di mercato dell'azienda = +20%
- Aliquota fiscale = 5% (per i primi 5 anni); 24% (per i successivi)

Di seguito viene esposto il conto economico per un arco temporale di 12 anni basandoci su una riclassificazione al costo del venduto.

Anni	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Vendite totali mercato Europeo(pz)	20.680.000	21.920.800	23.236.048	24.630.211	26.108.024	27.674.505	29.334.975	31.095.074	32.960.778	34.938.425	37.034.730	37.034.730
Quota di mercato	0,01%	0,012%	0,014%	0,017%	0,020%	0,024%	0,029%	0,035%	0,042%	0,050%	0,060%	0,072%
Vendite di lucchetti (pz)	2.000	2.544	3.236	4.116	5.235	6.659	8.470	10.774	13.705	17.433	22.174	26.609
Ricavi	183.978	234.019	297.673	378.640	481.630	612.633	779.269	991.230	1.260.845	1.603.795	2.040.027	2.448.033
Costi tot diretti	135.126	171.881	218.632	278.100	353.744	449.962	572.352	728.031	926.056	1.177.943	1.498.343	1.798.012
Costo progettazione	7.870											
Costi SEO (ottimizzazione della ricerca online)	6000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000
Advertising	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000
Costo brand	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Ammortamento stampante 1	71.883	71.883	71.883	71.883	71.883	71.883	71.883	71.883	71.883	71.883		
Ammortamento stampante 2				71.883	71.883	71.883	71.883	71.883	71.883	71.883	71.883	71.883
Ammortamento stampante 3							71.883	71.883	71.883	71.883	71.883	71.883
Ammortamento stampante 4									71.883	71.883	71.883	71.883
Ammortamento stampante 5										71.883	71.883	71.883
Ammortamento stampante 6											71.883	71.883
Ammortamento stampante 7											71.883	71.883
Ammortamento stampante 8												71.883
MARGINE LORDO INDUSTRIALE	**- 67.902**	**- 46.744**	**- 29.843**	**- 80.227**	**- 52.880**	**- 18.095**	**- 45.731**	**10.550**	**10.257**	**29.437**	**73.386**	**109.840**
Costo software gestionale (fatturazione)	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000
Commercialista	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400
Cloud e servizi IT (pc)	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85
Consulenze legali	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Costi amministrativi e del personale	70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000
Costo affitto locali	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000
EBIT	**- 171.387**	**- 150.229**	**- 133.328**	**- 183.712**	**- 156.365**	**- 121.580**	**- 149.216**	**- 92.935**	**- 93.228**	**- 74.048**	**- 30.099**	**6.355**
Tasse	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1525
UTILE DI ESERCIZIO	**- 171.387**	**- 150.229**	**- 133.328**	**- 183.712**	**- 156.365**	**- 121.580**	**- 149.216**	**- 92.935**	**- 93.228**	**- 74.048**	**- 30.099**	**4.830**

Table 28. Conto economico processo PBF-LB/M

Figura 28. Andamento utile di esercizio per il processo PBF-LB/M

Come si può notare dal grafico, per il processo PBF-LB/M non sono sufficienti dieci anni per raggiungere un utile di esercizio positivo. Tuttavia, la curva dell'utile di esercizio ha un andamento crescente nel tempo e si raggiunge un valore positivo intorno al dodicesimo anno. È importante notare come il numero di stampanti adoperate sia pari a 8 per una domanda di 26.609 pz (relativa all'ultimo anno).

5. CONFRONTO TRA PROCESSI (PBF-EB VS PBF-LB) E CONCLUSIONE

Nei capitoli 3 e 4 sono stati analizzati i costi da sostenere per la realizzazione di un U-lock prodotto in additive manufacturing. Di seguito riassumiamo le caratteristiche principali dei due processi analizzati.

VOCI COSTI DIRETTI	**PBF-LB [€/pz]**	**PBF-EB [€/pz]**
Costo setup	1,39	0,63
Costo di produzione (energia + gas)	7,13	7,33
Costo post-processing	17,92	9,38
Costo materiale	41,13	18,41
Costi tot diretti	**67,57**	**35,74**

Table 29. Confronto costi diretti (PBF-LB/M vs PBF-EB/M)

CARATTERISTICHE	**PBF-LB (EOS M290)**	**PBF-EB (ARCAM A2X)**	**UNITA' DI MISURA**
N° max pz realizzabili da una stampante in un anno	3600	1600	Pz
Costi tot diretti per 1 pz	67,57	35,74	€
Costo 1 stampante	718.833	756.100	€
Anni ammortamento stampante	10	10	Anni
Prezzo di vendita	92	92	€/pz
Punto di break-even	32.235	15.938	Pz
Primo anno con utile positivo	12°	10°	Anno
N° tot di stampanti necessarie per produrre 26.609 pz (raggiungibile in 12 anni)	8	17	Stampanti
Investimento in stampanti totale necessario per produrre 26.609 pz	5.750.664	12.853.700	€

Table 30. Caratteristiche riassuntive dei due processi (PBF-LB/M vs PBF-EB/M)

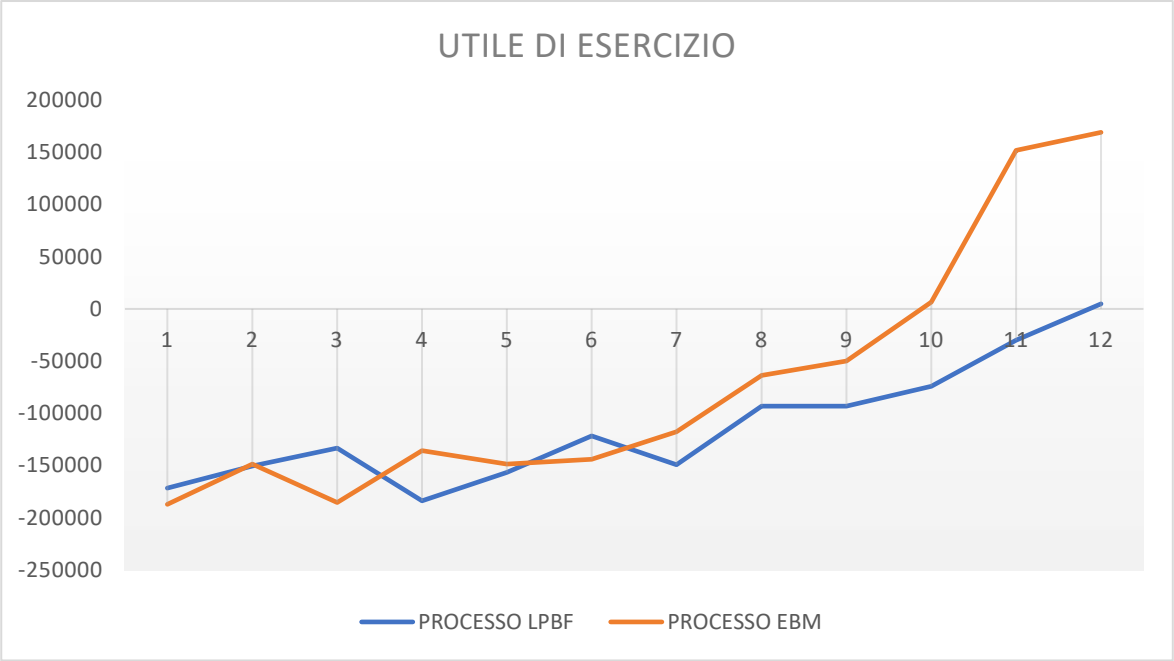


Figura 29. Confronto utile di esercizio (processo PBF-LB/M vs PBF-EB/M)

Come si può notare dalla tabella 29, i costi diretti relativi al processo PBF-EB sono nettamente inferiori rispetto al processo PBF-LB. Ciò fa sì che ci sia, sin da subito, un margine di contribuzione elevato per il primo processo.
Inoltre, con il processo con fascio di elettroni si ottiene il BEP ad un numero di pezzi inferiore (15.938 pz) e anche dopo un minor numero di anni. Tuttavia, la stampante ARCAM A2X riesce a realizzare un quantitativo massimo di pezzi annui ridotti (1600pz); quindi quando la domanda inizia a crescere di un quantitativo di pezzi annuali considerevole, il numero di stampanti necessarie e l'investimento ad esse associato diventa esoso. Al contrario, il processo PBF-LB (guardando la figura 29) appare meno conveniente perché ha una crescita dell'utile meno marcata. Si potrebbe dire che un investimento in EOS M290 nei primi anni sembrerebbe quasi inopportuno. Però se si guarda al numero di stampanti da acquistare (tabella 30) e quindi all'investimento da sostenere, si nota che è nettamente inferiore rispetto al processo con fascio di elettroni. Quest'ultimo elemento potrebbe portare a non escludere immediatamente il processo, soprattutto se si considera che un numero minore di stampanti significa anche una riduzione degli spazi e degli interventi di manutenzione (trascurati in questo lavoro).

In conclusione, con questo lavoro si è dimostrato che un U-lock con struttura reticolare può essere immesso sul mercato al pari dei lucchetti aventi prestazioni elevate. La produzione del nuovo dispositivo garantirebbe un ritorno economico sia con il processo PBF-LB che per quello PBF-EB. La scelta della tecnica più opportuna dipende dall'investimento che si vuole sostenere e dalla risposta che il mercato fornirà in termini di aumento di domanda. Ad una lenta crescita di quote di mercato potrebbe essere preferibile la scelta del processo PBF-EB, viceversa ad un aumento consistente della domanda sarebbe da preferire la tecnica PBF-LB; non bisogna tuttavia escludere la possibilità di poter ricorrere ad un'attività che preveda l'utilizzo di entrambi i macchinari.

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

[1] P. d. Torino, «Struttura "Maracas"». 2021.

[2] P. L. Iuliano, «Slide Additive Manufacturing».

[3] L. Benedetti, «Additive manufacturing: un futuro personalizzato,» *IndustriaMeccanica,* 2021.

[4] T. C. I. 2. ". m. a. T. C. C. 4. ". manufacturing", «Additive manufacturing — General principles — Fundamentals and vocabulary (EN ISO/ASTM 52900:2021),» BSI.

[5] P. L. F. I. G. F. C.-I. O.H. Laguna, «A review on additive manufacturing and materials for catalytic applications: Milestones, key concepts, advances and perspectives,» *Elsevier,* 2021.

[6] C. S. a. A. Manonukul, «A Review on Material Extrusion Additive Manufacturing of Metal and How It Compares with Metal Injection Moulding,» *MDPI,* 2022.

[7] P. B. H. H. F. T. S. D. &. K. E. Amaia Jiménez, «Powder-based laser hybrid additive manufacturing of metals: a review,» *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* 2021.

[8] L. Monaco, «Caratterizzazione e analisi di variabilità dei difetti di un componente in alluminio prodotto tramite DMLS,» 2021.

[9] P. I. A. D. Prete, «Dispensa sull'Additive Manufacturing».

[10] M. H. Y. Z. a. Y. Q. Zuyu Li, «A Description Logic Based Ontology for Knowledge Representation inProcess Planning for Laser Powder Bed Fusion,» 2022.

[11] [Online]. Available: https://shopit3.bhisnowman.com/category?name=pallinatrici%20industriali.

[12] R. Stefano, «Modello di analisi costi per il processo di Selective Laser Melting,» 2019.

[13] [Online]. Available: https://www.eos.info/en/additive-manufacturing/3d-printing-metal/eos-metal-systems.

[14] «GE Additive,» [Online]. Available: https://www.ge.com/additive/products-services.

[15] «SLM Solution,» [Online]. Available: https://www.slm-solutions.com/.

[16] «3D Systems,» [Online]. Available: https://it.3dsystems.com/3d-printers/metal.

[17] «Renishaw,» [Online]. Available: https://www.renishaw.it/it/stampa-3d-in-metallo--32084.

[18] I. Vecchio, «Progettazione di un telaio motociclistico realizzato,» 2019.

[19] L. I. ManuelaGalati, «A literature review of powder-based electron beam melting focusing on numerical simulations,» *Elsevier,* 2018.

[20] L. Piovano, «Caratterizzazione e ottimizzazione di un sistema Electron Beam Melting Arcam Q10 plus,» 2019.

[21] M. F. F. F. A. L. a. D. P. G. Costabilea, «Cost models of additive manufacturing: A literature review,» *International Journal of Industrial Engineering Computations,* 2016.

[22] T. C. H. R. Ruffo, «Cost estimation for rapid manufacturing - Laser sintering production for low to medium volumes,» *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture,* 2006.

[23] M. M. ,. C. F. ,. F. C. Paolo Cicconi, «Metal Additive Manufacturing for the Rapid Prototyping of Shaped Parts: A Case Study,» *Computer-Aided Design & Applications,* 2021.

[24] M. B. E. A. C. ,. R. D. W. Jin Ding, «The economics of additive manufacturing: Towards a general cost model,» *International Journal of Production Economics,* 2021.

[25] O. Gatti, «Bike Italia,» [Online]. Available: https://www.bikeitalia.it/antifurti-per-non-farsi-rubare-la-bici/#par1.

[26] «ABUS,» [Online]. Available: https://www.abus.com/it.

[27] «kryptonite,» [Online]. Available: https://www.kryptonitelock.it/it/home.html.

[28] «ATPO,» [Online]. Available: https://www.bergamaschi.com/index.php?option=com_content&view=article&id=2888:kryptonite-atpo-anti-theft-protection-offer&catid=4&Itemid=261&lang=en.

[29] «Btwin,» [Online]. Available: https://cyclinside.it/btwin-a-curiosare-in-un-miracolo-tutto-francese-2/.

[30] «Trelock,» [Online]. Available: https://www.trelock.com/en/company.

[31] «Masterlock,» [Online]. Available: https://it.masterlock.eu/about-us/history.

[32] L. Erica, «STUDIO E OTTIMIZZAZIONE DEL PROCESSO DI FABBRICAZIONE ADDITIVA (SLM) PER APPLICAZIONI IN AMBITO BIOMEDICALE: PRODUZIONE DI PROTESI E STRUTTURE RETICOLARI,» 2017.