

POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Gestionale – Classe LM-31

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale



Tesi di Laurea di II livello

**Impatto dell'Additive Manufacturing  
sulla Supply chain**

Relatore:  
Prof.ssa Arianna Alfieri

Candidato:  
Federico Modena

Correlatore:  
Prof.ssa Erica Pastore

Anno Accademico 2023-2024

## **Abstract**

Il presente lavoro si presenta come una Systematic Literature Review con l'obiettivo di delineare le dinamiche e l'impatto derivante dall'introduzione dell'Additive Manufacturing (AM) nella gestione della supply chain.

Nel capitolo iniziale, si delinea una panoramica della supply chain e delle differenti fasi che la compongono, identificandone le caratteristiche peculiari. Contestualmente, si compie un'analisi dell'AM, partendo dalla parte storica, successivamente mettendo in luce i suoi processi principali e le varie tipologie produttive maggiormente impiegate.

Nel secondo capitolo, viene condotta una disamina sulle principali configurazioni della supply chain orientate all'AM, si approfondisce l'impatto di questa tecnologia su ciascuna fase della catena logistica, delineandone le correlazioni e le conseguenti performance. Questa sezione mira a fornire una comprensione delle modifiche strutturali e operative indotte dall'AM nel contesto della supply chain.

Il terzo capitolo si concentra sull'importanza dei pezzi di ricambio nell'ecosistema industriale e sul loro ruolo nel mantenimento dell'operatività di macchinari e veicoli. Si esamina l'espansione del settore e le sue previsioni di crescita. Si analizza la tipologia di supply chain utilizzata nel settore, con un confronto tra configurazioni centralizzate e distribuite. Si esplorano le macrofasi nella gestione delle parti di ricambio, dal processo di digitalizzazione alla produzione finale tramite l'Additive Manufacturing (AM), evidenziando sfide e opportunità.

# Sommario

Abstract .....	1
Introduzione.....	4
Review della letteratura.....	5
<b>1 Am &amp; supply chain.....</b>	<b>7</b>
1.1 Supply Chain.....	7
1.1.1 Definizione.....	7
1.1.2 Macro-fasi .....	8
1.2 Additive Manufacturing.....	10
1.2.1 Cenni Storici .....	10
1.2.2 Definizione.....	11
1.2.3 Processi .....	13
1.2.4 Tipologie produttive.....	20
1.2.5 Fattori trainanti e principali sfide.....	33
<b>2 Supply chain per Additive Manufacturing .....</b>	<b>36</b>
2.1 Tipologie di supply chain.....	37
2.1.1 Configurazione centralizzata.....	37
2.1.2 Configurazione decentralizzata.....	39
2.1.3 Configurazione ad hub .....	41
2.1.4 Configurazione domestica.....	42

2.1.5	Confronto e tipologia più utilizzata .....	43
2.1.6	Algoritmi di allocazione.....	44
2.2	Impatto sulle differenti fasi .....	49
2.2.1	Approvvigionamento .....	49
2.2.2	Produzione .....	50
2.2.3	Distribuzione.....	52
2.3	Impatto sulle prestazioni dell'Am in Supply chain.....	52
<b>3</b>	<b>Am per l'industria delle parti di ricambio .....</b>	<b>55</b>
3.1	Introduzione e specifiche di settore .....	55
3.2	Tipologia di SC maggiormente utilizzata .....	58
3.2.1	Confronto tra configurazioni.....	59
3.3	Macrofasi nella gestione delle parti di ricambio .....	60
	Conclusione.....	64
	Bibliografia/ Sitografia.....	66
	Elenco figure .....	75
	Ringraziamenti .....	77

## Introduzione

L'Additive Manufacturing (AM), comunemente noto come stampa 3D, rappresenta una rivoluzione nell'approccio tradizionale alla produzione. In un panorama dove la complessità e la personalizzazione sono diventate aspetti critici, l'AM si è affermato come una tecnologia all'avanguardia capace di trasformare radicalmente il modo in cui concepiamo e realizziamo i prodotti [1]. Questa innovativa metodologia di produzione consente la creazione di oggetti tridimensionali strato dopo strato, eliminando i vincoli delle tecniche tradizionali [2],[3] e aprendo la strada a un nuovo paradigma nella produzione di componenti e prodotti su scala globale. L'impatto dell'Additive Manufacturing, tuttavia, si estende ben oltre il mero ambito della produzione, permeando profondamente la gestione della Supply Chain. Le sue caratteristiche distintive, tra cui la flessibilità di design, la possibilità di produzione su richiesta e la capacità di creare complessi assemblaggi in un'unica fase, hanno generato nuove prospettive nella catena di approvvigionamento [1],[4]. Questa innovazione tecnologica ha non solo rivoluzionato la configurazione stessa della Supply Chain ma ha anche avuto impatti significativi su diversi aspetti, come la logistica, la gestione delle parti di ricambio e i modelli di distribuzione [5]. Nella sfida di adattarsi a un mercato sempre più dinamico e personalizzato, l'Additive Manufacturing emerge come una leva strategica capace di generare efficienze, ottimizzazioni e nuove opportunità nella gestione della catena di approvvigionamento [6].

## Review della letteratura

La presente tesi si propone di esplorare e analizzare l'impatto dell'Additive Manufacturing (AM) sulla gestione della catena di approvvigionamento; attraverso una Systematic Literature Review si mira a fornire una panoramica sugli sviluppi più recenti.

Inizialmente, è stata condotta una ricerca generale inserendo come parole chiave quelle presenti in *Figura 1* per identificare articoli pertinenti che trattassero dell'AM e della supply chain



*Figura 1: Parole più diffuse nei testi individuati*

Successivamente, attraverso una lettura più dettagliata ed andando ad eliminare articoli datati, sono stati selezionati come più rilevanti 71 fonti che successivamente sono stati suddivisi e classificate secondo diversi criteri:

- Tipologia di lavorazione: Innanzitutto, sono stati esaminati gli articoli in base alle diverse tecnologie di produzione additiva utilizzate, allo scopo di comprendere le metodologie e gli approcci adottati nel contesto dell'AM.

- Tipologia di Supply chain: è stata esaminata la letteratura per valutare le diverse tipologie di supply chain utilizzate per l'AM; questo approccio ha permesso di comprendere come l'AM influenzi la struttura e l'organizzazione della catena di approvvigionamento, offrendo un quadro delle varie modalità di implementazione.
- Impatto sulle fasi: sono stati analizzati gli articoli per valutare l'impatto dell'AM sulle diverse aree funzionali della supply chain, inclusi approvvigionamento, produzione, distribuzione, Tale analisi ha consentito di comprendere in che modo l'AM influenzi specificamente ogni fase del processo di gestione della supply chain, fornendo una panoramica dettagliata delle implicazioni pratiche.
- Impatto sulle prestazioni; si è analizzato l'impatto su diverse metriche chiave, tra cui costi reattività affidabilità e sostenibilità
- Settori industriali: Infine, è stata condotta un'ulteriore ricerca focalizzata sul settore industriale delle parti di ricambio, al fine di esplorare in modo o l'applicazione dell'AM in questo contesto particolare.

# 1 Am & supply chain

## 1.1 Supply Chain

### 1.1.1 Definizione

La catena di approvvigionamento, o supply chain, è un concetto chiave nel campo della gestione aziendale e comprende l'insieme delle attività coinvolte nella fabbricazione e diffusione di beni e servizi, dal momento dell'acquisizione delle materie prime fino al consumo finale del cliente. Essa si configura come una rete intricata di organizzazioni, risorse, tecnologie e attività che collaborano per soddisfare in modo efficiente ed efficace la domanda di mercato.

Il termine "supply chain" mette in evidenza la sequenza di processi attraverso cui i prodotti o servizi si muovono lungo una serie di nodi, iniziando dal fornitore e arrivando fino al cliente finale [7].

È opportuno gestire in modo efficiente la supply chain per perseguire obiettivi fondamentali, quali la diminuzione dei costi, l'ottimizzazione delle risorse, l'incremento dell'efficienza operativa e la soddisfazione del cliente.

La catena di approvvigionamento coinvolge una varietà di attori, tra cui fornitori di materie prime, produttori, distributori, rivenditori e infine i consumatori, la sua efficacia dipende da diversi fattori, tra cui la sincronizzazione dei processi, la visibilità della catena logistica, la gestione degli stock, la collaborazione tra partner commerciali e l'adozione di tecnologie avanzate.

Nell'attuale contesto globale e digitalizzato, le sfide e le opportunità della supply chain sono in costante evoluzione; le aziende si trovano davanti alla



necessità di adattarsi rapidamente ai cambiamenti di mercato e di implementare tecnologie innovative per migliorare la visibilità e la tracciabilità della catena di approvvigionamento.

Le nuove tecnologie, che sono emerse negli ultimi anni stanno cambiando la progettazione e il funzionamento delle catene di approvvigionamento [8].

### 1.1.2 Macro-fasi

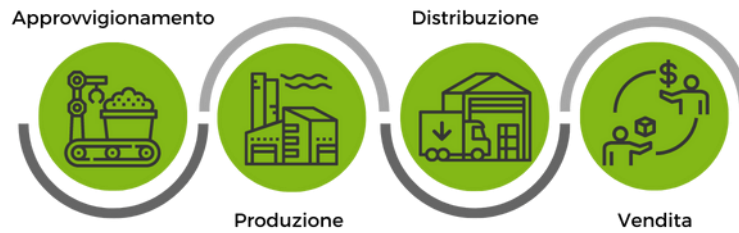
La gestione della supply chain rappresenta un elemento essenziale per il successo di qualsiasi industria, e tale processo complesso è suddiviso in diverse fasi chiave delineate in *Figura 2*:

- **Approvvigionamento:** La fase di approvvigionamento rappresenta il nodo iniziale della supply chain, dove le materie prime necessarie per la produzione vengono acquisite. Questa fase coinvolge diversi processi chiave, tra cui la selezione dei fornitori, la negoziazione dei contratti, la valutazione della qualità delle materie prime e la gestione degli stock. L'efficienza in questa fase è cruciale per garantire un flusso costante di materiali di alta qualità e per evitare interruzioni nella produzione; è opportuno utilizzare un approccio “just in time” per avere a disposizione solo la quantità di materiale strettamente necessario, ottimizzando lo spazio di magazzino e riducendo i costi e le inefficienze nella gestione nelle scorte [9].
- **Produzione:** Dopo aver acquisito le materie prime, inizia la fase di produzione, dove avviene la trasformazione di queste materie in prodotti per soddisfare la richiesta del mercato. Questa fase può coinvolgere

processi complessi e diverse operazioni che variano a seconda del settore e del tipo di prodotto. L'obiettivo è massimizzare l'efficienza produttiva, garantire la qualità del prodotto e ridurre il ciclo time. La gestione della produzione può includere la pianificazione della produzione, la programmazione delle macchine, il controllo della qualità e la manutenzione degli impianti.

Durante questo stadio, riveste un ruolo fondamentale il concetto di Lean Production, che rappresenta un approccio sistematico alla produzione mirato all'eliminazione degli sprechi all'interno del sistema produttivo [9].

- **Distribuzione:** In seguito alla produzione, i prodotti devono essere consegnati attraverso canali di vendita; la fase di distribuzione coinvolge la logistica e il trasporto, gestendo il movimento delle merci attraverso la catena di approvvigionamento. Questa fase include attività come la gestione degli stock, la selezione delle modalità di trasporto, la tracciabilità delle merci e la gestione dei centri di distribuzione. L'obiettivo è consegnare i prodotti in modo tempestivo ed efficiente, riducendo al minimo i costi di trasporto e mantenendo bassi livelli di stock [9].
- **Vendita:** La vendita è la fase finale della catena e rappresenta il momento in cui il prodotto o servizio viene offerto al cliente. Essa è essenziale per il successo complessivo della supply chain, poiché influisce sulla soddisfazione del cliente sulla generazione di entrate per l'azienda



*Figura 2: differenti fasi della Supply Chain [9]*

In sintesi, queste quattro fasi della supply chain sono interconnesse tra di loro e la loro coesione è fondamentale per garantire un flusso continuo e efficiente di materie prime, prodotti in lavorazione e prodotti finiti. Una gestione efficace di ciascuna fase contribuisce al successo complessivo della catena di approvvigionamento, consentendo alle aziende di rispondere in modo flessibile alle esigenze del mercato e di soddisfare le aspettative dei clienti.

## **1.2 Additive Manufacturing**

### **1.2.1 Cenni Storici**

La stampa 3D e la manifattura additiva, spesso percepite come fenomeni relativamente recenti, hanno radici che risalgono agli anni '70 e '80. Sebbene la prima stampante a getto d'inchiostro sia stata introdotta sul mercato alla fine degli anni '70, le prime sperimentazioni con fotopolimeri per creare elementi tridimensionali risalgono agli anni '60, condotte presso il Battelle Memorial Institute di Columbus, Ohio d'inchiostro [2].

Queste sperimentazioni coinvolgevano l'uso di fasci laser intersecanti per solidificare resine fotopolimeriche, un passo importante verso la tecnologia che sarebbe diventata nota come stampa 3D.

L'avvio verso l'adozione di queste nuove tecnologie si è manifestato con il deposito del brevetto per la prototipazione rapida nel 1981 da parte di Hideo Kodama, seguito nel 1984 dall'ideazione della stereolitografia (SLA) da parte di Charles Hull. La SLA utilizza una fonte luminosa per indurire strato dopo strato una resina liquida, creando così oggetti tridimensionali Hull [2], [10].

A partire dal 1990, la stampa 3D ha subito un'evoluzione significativa, con aziende, startup, scienziati e professionisti medici che hanno iniziato a sperimentare con questa tecnologia. Nei primi anni del 2000, emersero le prime discussioni riguardo alla necessità di un termine che riflettesse la natura additiva del processo, in contrasto con i processi tradizionali sottrattivi come la lavorazione CNC. Questo ha portato alla definizione del termine "Additive Manufacturing" (AM), che oggi identifica tutte le applicazioni che coinvolgono l'utilizzo di una tecnologia che sovrappone uno strato dopo l'altro seguendo le informazioni di un modello tridimensionale [2].

### 1.2.2 Definizione

La produzione additiva, conosciuta anche come produzione a strati o Additive Manufacturing (AM) in inglese, rappresenta un processo industriale innovativo finalizzato alla creazione di vari manufatti a partire da modelli tridimensionali computerizzati [11]. Questa tecnica rivoluzionaria impiega diverse tecnologie per generare prodotti aggiungendo strati successivi uno sopra l'altro fino al completamento del manufatto desiderato [2].

Tale approccio, come illustrato in *Figura 3* costituisce una marcata deviazione dalle tradizionali tecnologie di produzione, che si basano sulla sottrazione di materiale, come nel caso della fresatura o tornitura [3]. La produzione additiva ha introdotto una digitalizzazione nell'ambito

manifatturiero, facilitando una comunicazione continua tra i sistemi informatici e le strutture produttive, sfruttando anche lo sviluppo di Internet.

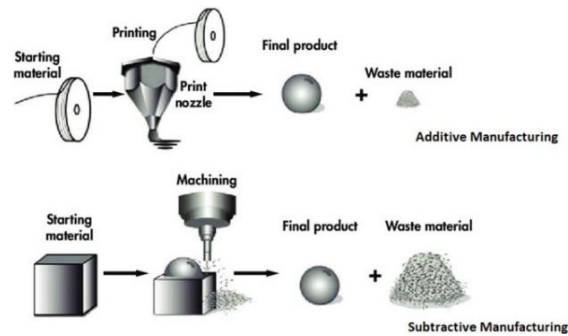


Figura 3: Differenza tra Additive Manufacturing e Subtractive Manufacturing [12]

Recentemente, le tecnologie di produzione additiva hanno superato la sola fase di prototipazione per cui erano principalmente utilizzate, ricoprendo una posizione cruciale nell'ottimizzazione dei processi produttivi e nel potenziamento delle capacità della catena di approvvigionamento. Questa innovazione offre ai produttori l'opportunità di rivedere e semplificare i loro processi, riducendo il numero di fasi necessarie per la produzione di un prodotto [13] tuttavia, nonostante i progressi degli ultimi trent'anni, il settore dell'AM è ancora in fase di crescita (Figura 4) e gli avanzamenti tecnologici sono ancora in corso.

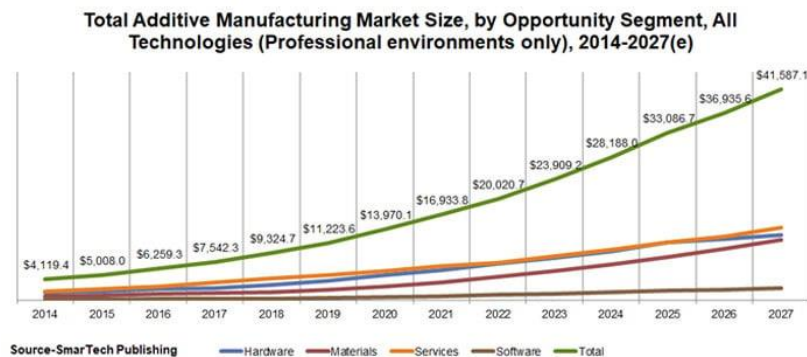


Figura 4: grafico crescita del mercato dell'additive manufacturing [14]

La tecnologia AM, con la sua innovatività, apre nuove prospettive; offre alle aziende la possibilità di migliorare l'efficienza produttiva e semplificare notevolmente i metodi tradizionali [6] contribuendo significativamente alla riduzione di tempi e costi. L'AM offre risparmi considerevoli nelle fasi di innovazione, prototipazione e test del finale prodotto. Questo risparmio, sia in termini di costi che di tempo, libera risorse che possono essere indirizzate verso altre aree, rendendo le aziende più efficienti e competitive [13].

### 1.2.3 Processi

L'Additive Manufacturing, si configura come un processo “design driven manufacturing”: il procedimento inizia con la creazione di un modello tridimensionale dell'oggetto da fabbricare, che attraverso appositi software, viene successivamente trasformato in un file in formato STL e processato in un programma di Slicing. La peculiarità distintiva della stampa 3D risiede proprio nella realizzazione del componente mediante l'impiego di materiali vari che vengono stratificati progressivamente per costituire l'oggetto finito [15].

Indipendentemente dalla tipologia di produzione additiva che viene utilizzata, i passaggi che vanno dalla progettazione CAD virtuale (computer-aided design) alla realizzazione delle parti fisiche finali possono essere delineati nelle seguenti fasi identificate in *Figura 5* [16]:

- Modello CAD 3D: modellazione del componente attraverso un apposito software di progettazione.

- Conversione file in Stl: i file in 3d devono essere convertiti in modelli STL/3MF per essere successivamente inseriti e letti dal programma di Slicing.
- Trasferimento del file nel software di Slicing per l'elaborazione e conversione in file macchina: in questa fase l'oggetto viene posizionato, orientato e vengono inseriti i parametri di stampa.
- Preparazione macchinari: vengono caricati i materiali e preriscaldata la macchina.
- Produzione: viene effettivamente prodotto l'oggetto.
- Post-elaborazione: vengono tolti eventuali supporti e aggiustate possibili imperfezioni dell'oggetto.



Figura 5: Fasi di processo stampa 3d [17]

#### 1.1.1.1. Cad

La progettazione CAD (Computer-Aided Design) nell'Additive Manufacturing (AM) rappresenta una fase fondamentale in cui si parte da un'idea di progetto e si procede al disegno vettoriale attraverso l'utilizzo di un software CAD (Computer Aided Drafting), questi programmi consentono di stabilire le geometrie, i parametri del modello tridimensionale che si intende realizzare e assicurano massima precisione, contribuendo a minimizzare gli errori.

Il risultato di questa modellazione 3D è un file in formato STL che rappresenta virtualmente l'oggetto da produrre, questo file STL conterrà tutte le informazioni necessarie sulla forma, le dimensioni e la struttura del manufatto, che verrà successivamente elaborato mediante software pre stampa. Questi software convertono il modello vettoriale nel codice macchina, pronto per la successiva fase di stampa [18].

La progettazione CAD nell'AM offre diversi vantaggi, tra cui la possibilità di ridurre i costi di sviluppo dei prodotti, migliorare la produttività, garantire una visualizzazione accurata del prodotto finale e accelerare il time-to-market. Inoltre, il sistema CAD facilita la documentazione completa dei progetti, inclusi dettagli come geometrie, quote e distinte base, consentendo un facile riutilizzo dei dati di progettazione.

#### 1.2.3.1.1 Reverse Engineering

Il reverse engineering, o ingegneria inversa, è il processo attraverso il quale un oggetto o un prodotto esistente viene analizzato in dettaglio per comprenderne il funzionamento, la struttura interna o il design. L'obiettivo principale del reverse engineering è ottenere un file 3d di un oggetto senza necessariamente avere accesso al suo progetto originale o ai suoi dettagli costruttivi, in modo da poter replicarla o apportare modifiche o miglioramenti [19].

Mediante uno scanner 3D o tramite fotogrammetria, ovvero una sequenza di foto, si crea una struttura poligonale che rappresenta la forma dell'oggetto,



evidenziandone il volume; vengono fatte più scansioni consecutive ed ognuna di esse produce una nuvola di punti o una struttura che riflette la parte specifica inquadrata dal sistema di scansione. Iterando il processo da diverse angolazioni, si è in grado di ottenere l'intera rappresentazione dell'oggetto [20].

Questo processo può essere impiegato ad una ampia varietà di oggetti, tra cui prodotti manufatti e pezzi meccanici, il suo impiego e diffusione sta crescendo significativamente grazie alla progressiva accessibilità dei prezzi.

## 3D REVERSE ENGINEERING

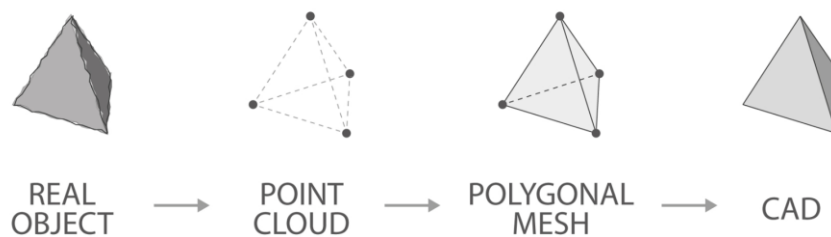


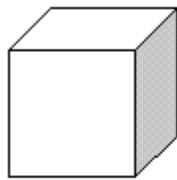
Figura 6: fasi del reverse engineering [20]

### 1.2.3.1.2 Conversione in Stl e slicing

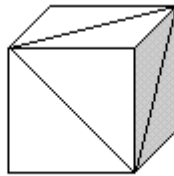
La conversione in STL, acronimo "Standard Tessellation Language" è una fase cruciale nella preparazione di modelli tridimensionali per la stampa 3D. (STL); comporta la trasformazione di un modello 3D, spesso creato in software di modellazione CAD (Computer-Aided Design), in un formato di file STL.

Questo tipo di struttura approssima le superfici di un oggetto solido mediante l'utilizzo di triangoli, per un modello di base, ad esempio una scatola illustrata nella *figura 1*, le sue superfici possono essere rappresentate

approssimativamente con dodici triangoli, ma come evidenziato nella *figura 2* all'aumentare della complessità della superficie, si generano un maggior numero di triangoli, come illustrato nella *figura 3*.



**Figure 1**



**Figure 2**



**Figure 3**

*Figura 7: Conversione file in Stl [21]*

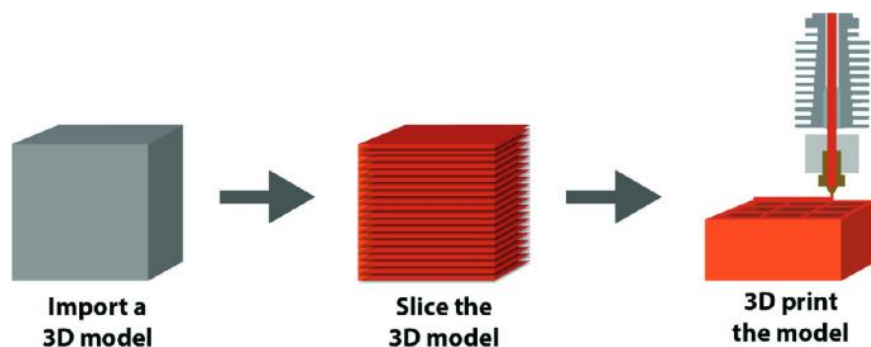
All'aumentare delle dimensioni del file STL, si verifica un incremento del numero di triangoli presenti sulla superficie del modello; per una geometria elementare, caratterizzata da poche curve le dimensioni del file possono aggirarsi attorno a qualche centinaio di kilobyte, nel caso di modelli più intricati con componenti di alta qualità si genereranno file con dimensioni comprese tra 1 e 5 megabyte [21].

Questa mesh che si viene a creare è ciò che verrà poi interpretato dalla stampante 3D e la precisione di essa può influire sulla qualità della stampa; quindi, è importante avere un modello STL ben definito e ottimizzato.

Dopo la conversione del modello in formato STL, il passaggio successivo è il processo di "affettamento" (slicing). Lo slicing implica la suddivisione virtuale in sottili strati orizzontali, trasformando il modello tridimensionale in una sequenza di sezioni bidimensionali [22]. Ogni strato rappresenta un'entità fisica che la stampante 3D costruirà in successione durante il processo di stampa. In questo stadio, vengono configurate varie impostazioni cruciali, come l'altezza dello strato, la densità di riempimento, la temperatura di

estrusione e molti altri parametri; queste configurazioni hanno un impatto diretto sulla qualità, sulla resistenza e sull'aspetto del modello finale.

Il risultato dell'affettamento è un file di stampa, spesso in formato G-code, contenente istruzioni specifiche per la stampante che guidano la movimentazione del suo ugello, indicano quando e dove depositare il materiale e dettano come costruire ciascuno strato fino al completamento del modello 3D.



*Figura 8: Slicing di un modello 3d [23]*

### 1.2.3.1.3 Stampaggio

La fase di stampa 3D rappresenta il momento cruciale in cui il nostro progetto si materializza, dopo aver scelto il tipo di filamento da utilizzare, si carica il file STL e si configurano i parametri prima di avviare la stampa. La durata del processo di stampa sarà direttamente proporzionale alle dimensioni dell'oggetto e alla qualità desiderata, una volta completata la stampa è essenziale consentire al materiale di raffreddarsi prima di rimuoverlo agevolmente dal piano di stampa

#### 1.2.3.1.4 Post-produzione

La fase di post-produzione nell'Additive Manufacturing (AM), è il periodo successivo alla stampa 3D durante il quale vengono eseguite una serie di operazioni per preparare e migliorare il prodotto finito, questa fase è essenziale per ottenere risultati finali di alta qualità e soddisfare gli standard richiesti [24].

Le attività di post-produzione possono variare a seconda del materiale utilizzato, del processo di stampa 3D specifico e delle caratteristiche desiderate per l'oggetto finale.

Di seguito sono riportate alcune delle attività comuni di post-produzione nell'Additive Manufacturing [25]:

- **Rimozione del Supporto:** Durante la stampa 3D, possono essere utilizzati supporti temporanei per sostenere parti dell'oggetto durante la costruzione dopo la stampa, è necessario rimuovere questi supporti, spesso utilizzando attrezzi o solventi, per ottenere una superficie pulita e liscia.
- **Finitura Superficiale:** Alcuni oggetti stampati possono avere superfici ruvide o con lievi deformità, mediante levigatura o carteggiatura si può ottenere una superficie più liscia e esteticamente gradevole.
- **Verniciatura e Finiture Estetiche:** Per migliorare l'aspetto estetico del prodotto, è possibile applicare vernici, rivestimenti o finiture speciali; questo passaggio è particolarmente importante per prodotti destinati a scopi estetici o di presentazione.
- **Trattamenti Termici e Chimici:** Alcuni materiali possono beneficiare di trattamenti termici o chimici post-stampa per migliorare le proprietà meccaniche, la resistenza o la durabilità del prodotto finale.

- **Montaggio e Assemblaggio:** Se l'oggetto finale richiede più parti, la fase di post-produzione può coinvolgere il montaggio e l'assemblaggio di queste componenti.

La fase di post-produzione è fondamentale per garantire che i prodotti stampati soddisfino gli standard di qualità richiesti e che possano essere utilizzati o presentati in modo efficace, essa infatti apporta valore al processo di Additive Manufacturing, permettendo la produzione di componenti finali funzionali e esteticamente accattivanti [25].

#### 1.2.4 Tipologie produttive

La Manifattura Additiva è una forma di produzione che consente la creazione di oggetti strato dopo strato, direttamente da un modello 3d, esistono diverse tecnologie di stampa 3D, le principali differenze tra di esse riguardano il processo di deposizione degli strati.

Alcuni metodi utilizzano materiali che si fondono o sinterizzano per formare gli strati, mentre altri depositano materiali in stato liquido, successivamente induriti [26].

Le tipologie produttive nell'ambito dell'Additive Manufacturing (AM) sono definite e classificate dalla normativa ISO-ASTM-52900:2021, che fornisce una guida essenziale per comprendere e categorizzare i vari processi impiegati nella produzione additiva.

La scelta della tipologia produttiva da impiegare dipende da una serie di fattori, inclusi il materiale, le proprietà fisiche e chimiche dell'oggetto da produrre, la tecnologia disponibile nell'azienda e altri aspetti come costo,

tempi di produzione, complessità geometrica dell'oggetto, volumi di produzione e requisiti di finitura superficiale.

La normativa identifica sette principali tecnologie di produzione additiva, di cui tre sono specifici per i polimeri e quattro per i metalli.

### 1.1.1.2. Tecnologie per Polimeri

- **Material Extrusion:** La Material Extrusion (MEX) è una tecnologia di stampa 3D che utilizza un filamento termoplastico, solitamente in forma di bobina di plastica, come materiale di base. Durante il processo, il filamento viene alimentato in un estrusore, dove viene fuso e depositato in strati successivi sulla superficie di lavoro, riscaldata per ottenere una maggiore adesione. A mano a mano che i singoli strati vengono depositati, si raffreddano rapidamente e si solidificano, formando l'oggetto tridimensionale finale [27]. Il movimento preciso della piattaforma di stampa e dell'estrusore è controllato da istruzioni provenienti da un file di slicing, che suddivide il modello 3D in sezioni sottili per una costruzione dettagliata. Il processo prevede la deposizione di uno strato sulla superficie del precedente fino al termine del processo di fabbricazione *dell'oggetto* [28].

La MEX è ampiamente utilizzata per la sua semplicità, convenienza e versatilità nella produzione di prototipi, parti funzionali e oggetti diversi.

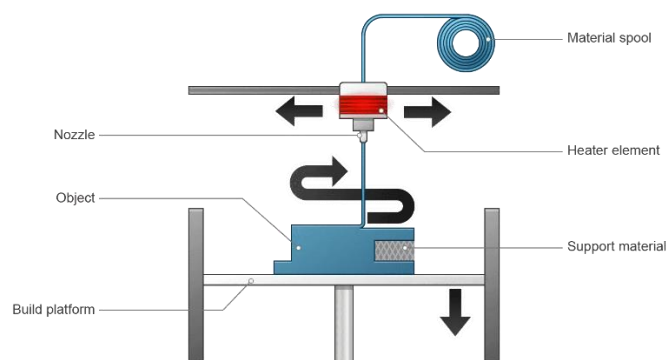


Figura 9: Processo di Material Extrusion [28]

- Material Jetting:** Il Material Jetting (MJT) è una tecnologia avanzata nella fabbricazione additiva nota per la sua precisione e la versatilità nell'uso di una vasta gamma di materiali. Questa metodologia si basa sulla deposizione di piccole gocce di materiali liquidi o fusi attraverso ugelli su uno strato di supporto, i quali vengono successivamente solidificati o polimerizzati tramite radiazioni ultraviolette o altre fonti di energia fino al completamento dell'oggetto 3d desiderato. In questa tecnica, un fotopolimero viene rilasciato da numerosi piccoli ugelli presenti in una testina di stampa, costruendo uno strato alla volta. Questa tecnologia permette di depositare il materiale di costruzione in modo veloce e lineare, durante il processo, le gocce vengono depositate sulla piattaforma di costruzione, successivamente esposte a luci UV per polimerizzarle e solidificarle direttamente [29].

I processi di Material Jetting sono particolarmente adatti per la creazione di prototipi realistici grazie al suo elevato livello di dettaglio, precisione e finitura superficiale liscia tuttavia richiedono spesso supporti, che vengono stampati in 3D contemporaneamente alla costruzione utilizzando un materiale dissolvibile. La stampa a getto di materiale consente ai progettisti di realizzare progetti utilizzando più colori e materiali in una singola stampa, offrendo una notevole flessibilità creativa

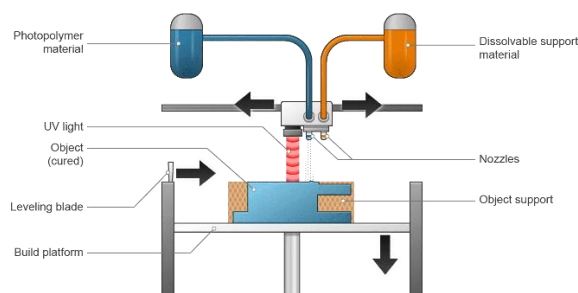


Figura 10: Processo di Material Jetting [29]



- **Vat Photopolymerization:** La Vat Photopolymerization (VP) è una tecnica di produzione additiva che coinvolge l'uso di un liquido fotosensibile definiti fotopolimeri, solitamente una resina liquida, contenuto in un serbatoio (vat) [27], [30]. Durante il processo *in Figura 11*, uno strato sottile di resina liquida viene estratto e posizionato su un piano di lavoro. Successivamente, una sorgente di luce ultravioletta (UV) viene utilizzata per indurire selettivamente la resina liquida in corrispondenza dei punti desiderati, solidificandola strato dopo strato fino a creare l'oggetto tridimensionale desiderato [31]. Dopo la stampa, l'oggetto può richiedere un trattamento post-processo per rimuovere la resina non polimerizzata e ottenere le proprietà meccaniche desiderate.

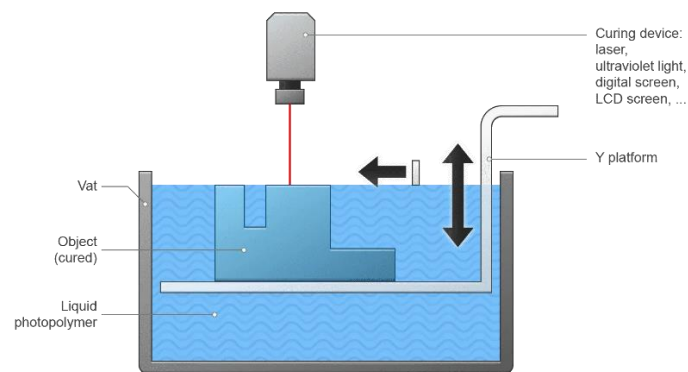
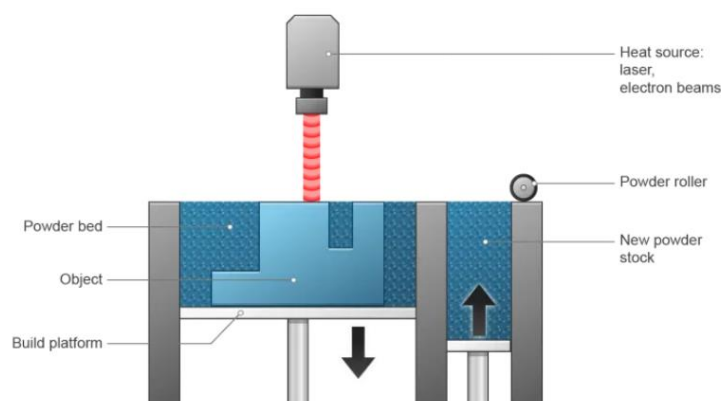


Figura 11: Processo di Vat Photopolymerization [32]

### 1.1.1.3. Tecnologie per metalli

- **Powder Bed Fusion:** Il processo di Powder Bed Fusion (PBF) nell'Additive Manufacturing (AM) è una tecnologia avanzata evidenziata in *Figura 12* che consente la produzione strato dopo strato di componenti tridimensionali mediante l'utilizzo di materiali in polvere; è un processo in cui un raggio laser, il cui fuoco viene controllato automaticamente da un computer, trasferisce energia in una superficie contenente un sottile strato di materiale in polvere preriscaldato. L'energia trasferita dal raggio laser fonde aree specifiche della superficie, dopo aver fuso uno strato ne viene depositato un altro e nuovamente il laser fonde questo strato che si incollerà a quelli precedenti [27], questo viene ripetuto fino al completamento del modello fisico. La restante polvere non sinterizzata viene rimossa mediante strumenti appositi durante la fase di finitura. Questo processo, particolarmente associato alla fabbricazione di oggetti metallici, elimina la necessità di utilizzare supporti strutturali; tuttavia, il suo principale svantaggio è rappresentato dalla superficie finale che risulta relativamente ruvida.



*Figura 12: processo di Sinterizzazione laser selettiva [33]*

- **Direct Energy Deposition:** La tecnica di Direct Energy Deposition (DED), conosciuta anche come Direct Energy Deposition, si caratterizza per la deposizione di materiale fuso o in polvere, guidata da un fascio di energia, solitamente laser o elettrico, per costruire oggetti con precisione e versatilità, comunemente impiegato per la riparazione o l'aggiunta di materiale a componenti preesistenti. Il processo coinvolge un braccio multi-assiale, comunemente dotato di 4 o 5 assi, su cui è posizionato l'ugello alimentato con materiale metallico fornito in polvere o sotto forma di filo. Durante il processo di deposizione, una sorgente di calore come un laser, un fascio di elettroni o un arco al plasma, fonde il materiale; questo procedimento viene ripetuto fino a quando gli strati si solidificano completamente, completando così la creazione dell'oggetto [34].

Il sistema monitora costantemente il posizionamento preciso del materiale fuso sulla superficie di lavoro e regola parametri critici per garantire la qualità del prodotto finale. La DED è impiegata spesso in applicazioni industriali, come la riparazione di componenti metallici complessi o la costruzione di nuove parti, benché sia certamente possibile utilizzare questa tecnologia per creare parti ex novo viene principalmente usata per lavorare e riparare oggetti già esistenti.

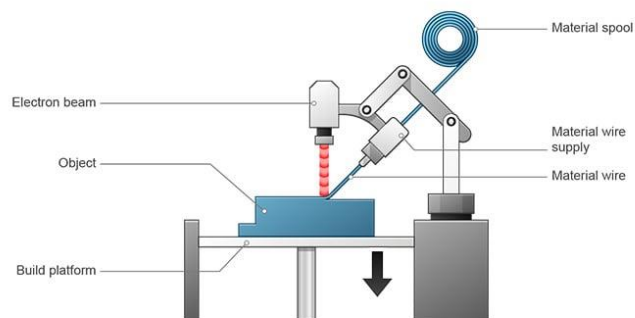
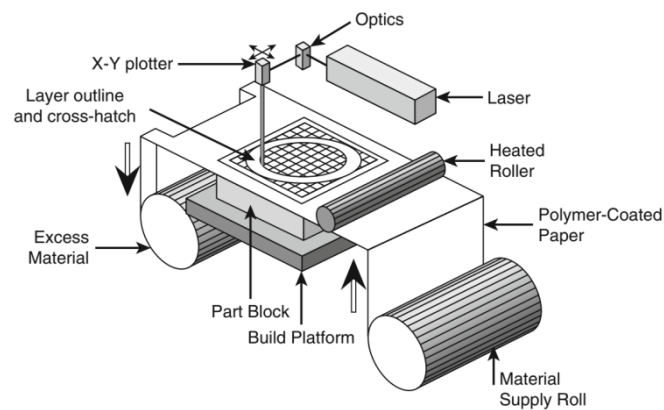


Figura 13: Processo di deposizione diretta di energia con l'uso di fascio di elettroni [34]

- Sheet Lamination:** Il processo di Sheet Lamination coinvolge la costruzione di oggetti tridimensionali sovrapponendo e unendo fogli sottili di metallo, polimeri o carta solitamente forniti mediante un sistema di rulli di alimentazione come si può notare in *Figura 14* [35]. Durante il processo, i fogli di materiale sono tagliati o modellati per adattarsi alla forma dell'oggetto desiderato, e quindi uniti insieme mediante adesivi, leganti termici o altri metodi di unione. Il processo può essere eseguito in modo sequenziale per costruire l'oggetto strato dopo strato. La Sheet Lamination è uno dei metodi Am meno accurati, è adatta per la produzione di oggetti di grandi dimensioni con geometrie abbastanza semplici, ed è utilizzata in applicazioni che vanno dai prototipi non funzionali a stampi per fusione e altri progetti semplici che non richiedono alti livelli di prestazioni e dettaglio [35].



*Figura 14: Processo di Sheet lamination [36]*

- **Binder Jetting:** Il processo di Binder Jetting (BJ) coinvolge la deposizione di uno strato di polvere sottile su un piano di lavoro, seguito dall'uso di un ugello che spruzza un legante liquido in determinati punti, legando le particelle di polvere tra loro. Questo processo viene ripetuto strato dopo strato fino a ottenere l'oggetto desiderato [37]. Una volta completata la stampa, l'oggetto è solitamente sottoposto a un trattamento post-processo per rimuovere l'eccesso di polvere e consolidare il materiale. Il Binder Jetting è noto per la sua velocità e versatilità, essendo in grado di lavorare con una vasta gamma di materiali, tra cui metalli, polimeri e ceramici [37]. Trova applicazioni in diversi settori, come l'aerospaziale, l'automotive, l'industria medica e la produzione di componenti industriali.

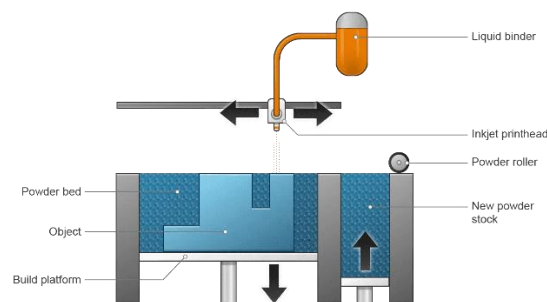


Figura 15: Processo di Binder Jetting [38]

#### 1.1.1.4. Tipologie di lavorazioni più usate e prospettive future

Recenti analisi nel campo della fabbricazione additiva (AM) delineano interessanti cambiamenti nel panorama delle tecnologie di stampa 3D. In particolare, si osserva una trasformazione degli utilizzi predominanti nell'adozione delle diverse metodologie, aprendo la strada a nuove lavorazioni emergenti. Secondo uno studio effettuato da Durach, Kurpjuweit, e Wagner in "The impact of additive manufacturing on supply chains e come

si può evincere dalla *Figura 16* si prospetta che il Material extrusion, attualmente primatista tra i processi AM più utilizzati, stia per cedere il suo status di leader. Questo processo, sebbene detenga il primo posto in termini di utilizzo, si prevede che presto perda terreno, posizionandosi al terzo posto. Nonostante questa tipologia sia economicamente vantaggiosa, presenta limitazioni significative, tra cui l'uso limitato a polimeri e plastica, una velocità di produzione inferiore rispetto ad altri processi e una qualità finale limitata allo spessore dell'ugello del materiale [39].

In secondo luogo, l'analisi rivela che la Powder Bed Fusion e il Material Jetting saranno destinate a ricoprire i due ruoli principali nell'AM, a differenza del Material Jetting, vincolato a materiali simili alla cera il Powder Bed Fusion può operare con metalli, polimeri, ceramica e compositi; questa diversificazione consentirà la produzione di parti adatte a applicazioni critiche, rendendo questa tecnologia attraente per la produzione di parti, attrezzature e pezzi di ricambio [40].

Il Material Jetting, pur vantando un'elevata precisione, si distingue per la sua gamma limitata di materiali, trovando principalmente applicazione nella prototipazione, ovvero nei test visivi e di forma/adattamento. Sebbene Material Jetting e Material Extrusion con materiali non metallici condividano un'area di applicazione simile, la qualità finale di un oggetto prodotto con il getto di materiale risulta superiore [39].

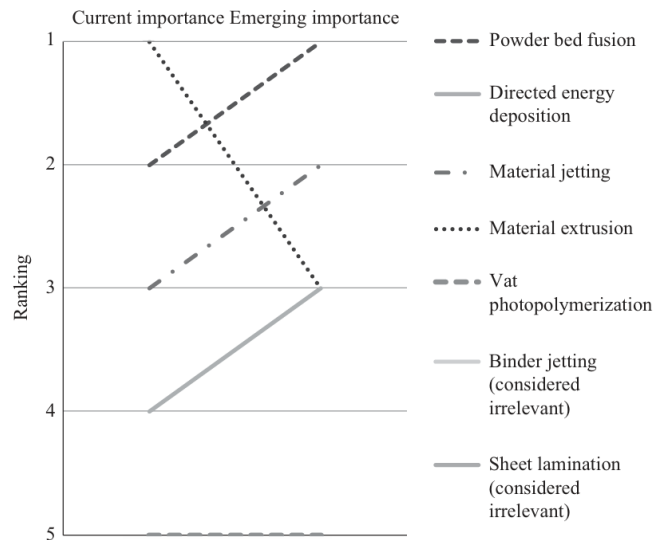


Figura 16: Ranking di importanza per le principali tecnologie per AM [39].

In conclusione, si prospetta che la Powder Bed Fusion e il Material Jetting saranno i veri protagonisti del mercato AM nel futuro.

#### 1.1.1.5. Settori Industriali e applicazioni

L'Additive Manufacturing, è un rivoluzionario processo produttivo che trova applicazioni estremamente diverse in vari settori, questa tecnologia innovativa consente la trasformazione radicale dei metodi tradizionali di progettazione e produzione.

La caratteristica distintiva della stampa 3d risiede nella sua capacità di non essere vincolata alla complessità dell'oggetto, al contrario, quanto più è intricato il componente, tanto più ha senso valutare questo tipo di lavorazione [41].

Lo sviluppo delle tecnologie di stampa 3D, contraddistinto dalla veloce deposizione degli strati uno sopra l'altro, dalla diversificata gamma di

materiali e dalle dimensioni raggiungibili [41] sta suscitando un crescente interesse nell'industria. Questa tecnologia, inizialmente adottata principalmente per la prototipazione, sta ora guadagnando terreno nella produzione di prodotti finiti, immediatamente disponibili per la vendita. Con la diversificazione dei materiali disponibili, inclusi quelli metallici, l'ottimizzazione della velocità di stampa e delle dimensioni degli oggetti realizzabili [41], come si evince dalla *Figura 17* la stampa 3D trova applicazione in vari settori.

Settori applicativi:

- Nei settori aerospaziale e della difesa, l'Additive Manufacturing è ampiamente impiegato per la realizzazione di prodotti leggeri e complessi, portando a una significativa riduzione del peso degli aeromobili. Questo settore impone alla produzione additiva la necessità di soddisfare elevate esigenze in termini di prestazioni meccaniche e termiche, riduzione del peso e minimizzazione delle perdite di materiale, sia per quanto riguarda i componenti polimerici che quelli metallici.[42]. La sua flessibilità consente la prototipazione rapida, la realizzazione di parti personalizzate e la creazione di pezzi di ricambio.
- Nel contesto automobilistico, l'AM è fondamentale per la creazione di prototipi, parti personalizzate e componenti leggeri. La sua capacità di produrre parti intricate in un'unica fase di produzione contribuisce all'innovazione nel design dei veicoli.
- Il settore medico e odontoiatrico sfrutta appieno l'AM per la manifattura di protesi personalizzate, modelli anatomici, preparazione di dime e guide chirurgiche con una qualità diagnostica superiore e una maggiore



sicurezza chirurgica, in tempi più brevi e con costi inferiori rispetto a quanto ottenibile tramite le tradizionali tecniche di *produzione* [42].

Questo approccio su misura migliora notevolmente l'efficacia dei trattamenti.

- In ambito elettronico, l'AM è una risorsa preziosa per la prototipazione veloce di schede circuito stampato (PCB) e la produzione di involucri personalizzati, ottimizzando i tempi di sviluppo dei prodotti elettronici.
- Il settore manifatturiero sfrutta l'AM per la realizzazione di utensili, stampi, prototipi e componenti personalizzati. La sua capacità di creare parti complesse senza l'utilizzo di attrezzature specializzate consente una maggiore flessibilità nei processi di produzione.
- Nella produzione di parti di ricambio in cui le metodologie additive sono utilizzate per produrre parti destinate alla manutenzione post-vendita di macchinari o impianti. L'aspetto vantaggioso principale consiste nella possibilità di stampare l'elemento richiesto tempestivamente e direttamente sul luogo, evitando la necessità di immagazzinarlo lungo l'intera catena di approvvigionamento [41].

In sintesi, l'Additive Manufacturing ha un impatto significativo in molteplici settori, promuovendo l'innovazione, customizzazione e l'efficienza nei processi produttivi.

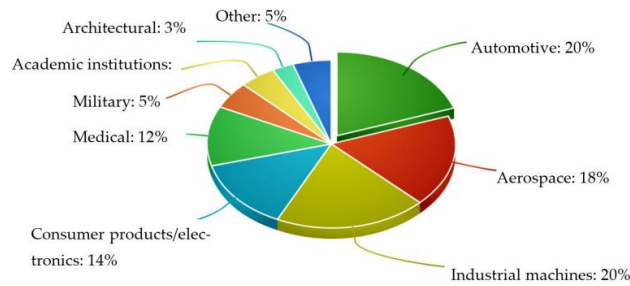


Figura 17: principali settori in cui viene adottata l'AM (Vafadar et al., 2021)

### 1.2.5 Fattori trainanti e principali sfide

La produzione additiva raffigura una rivoluzione nel panorama industriale, introducendo nuovi approcci nella realizzazione di prodotti [43].

Questa tecnologia offre una serie di vantaggi distintivi, ma allo stesso tempo, è soggetta a sfide che ne limitano l'adozione su larga scala. Esploreremo ora i fattori trainanti che rendono la produzione additiva attraente e le principali sfide che ne influenzano l'applicazione e l'integrazione nell'industria moderna.

Il primo vantaggio chiave della produzione additiva risiede nella dispersione di progettazione, questa tecnologia consente la creazione di componenti con geometrie complesse e personalizzate, superando le restrizioni delle metodologie tradizionali [1]. A differenza dei processi sottrattivi, che spesso implicano costi crescenti per geometrie complesse o particolari design, l'AM offre un costo più costante indipendentemente dalla complessità geometrica.

Come si evince in *Figura 18*, il costo associato alla produzione tramite metodi sottrattivi aumenta in modo proporzionale con la complessità geometrica del componente, contrariamente l'AM mantiene un costo relativamente stabile,

rendendo più accessibile la produzione di parti intricate e complesse, ciò apre la strada a innovazioni formali e funzionali che prima sembravano irraggiungibili.

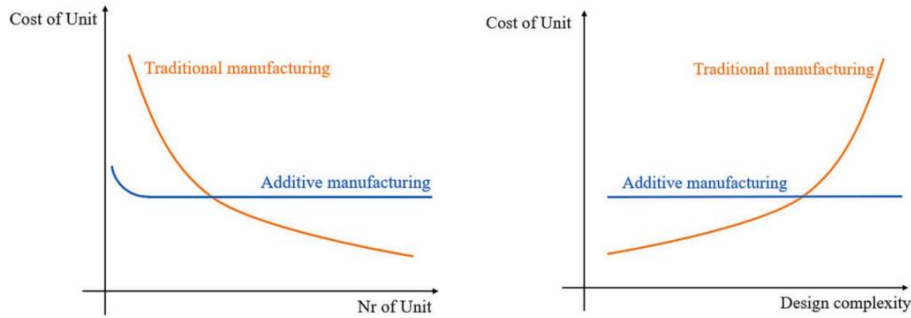


Figura 18: confronto di costi di produzione tra metodo tradizionale e additivo [44]

Un secondo punto di forza è la riduzione degli investimenti iniziali, l'adozione della produzione additiva può essere vantaggiosa per il lancio di nuovi prodotti, poiché riduce significativamente gli investimenti, permettendo una maggiore flessibilità in fase di prototipazione [45].

La varietà di materiali e colori rappresenta un altro vantaggio chiave, la possibilità di utilizzare materiali metallici e stampare in diversi colori apre nuovi orizzonti in termini di applicazioni e design.

Inoltre, la potenzialità di realizzare parti personalizzate la possibilità di adattare ogni componente alle esigenze specifiche di un cliente rappresentano un cambiamento di paradigma significativo, consentendo una produzione su misura che si allontana dai modelli di produzione di massa [1].

Sotto l'aspetto economico, offre costi di produzione ridotti per lotti ridotti, in situazioni in cui la manifattura di grandi volumi non è necessaria, questa tecnologia si rivela estremamente vantaggiosa. [46].

Tuttavia, nonostante questi vantaggi, la produzione additiva si scontra con alcune sfide rilevanti; i costi più elevati, la velocità di stampa, l'esigenza di personale qualificato e le restrizioni dovute alle limitazioni del piano di stampa possono ostacolare l'adozione su vasta scala, specialmente quando si mira alla produzione di grandi quantitativi, anche se si prevede che le nuove tecnologie portino nel tempo ad un aumento delle velocità (*Thomas, 2016*).

Sebbene la tecnologia abbia compiuto progressi notevoli, la produzione di oggetti di grandi dimensioni può ancora essere problematica. La presenza di supporti e imperfezioni rappresenta un altro aspetto critico; infatti, l'uso di supporti durante la stampa può generare rugosità superficiale che richiedono processi di post-elaborazione aggiuntivi.

Inoltre, la produzione additiva attualmente soffre di bassa automazione e bassa produttività difatti necessità di intervento umano che coniugato ad una produttività inferiore rispetto a processi convenzionali, può limitarne l'applicazione in ambienti ad alta produzione [45].

Infine, ostacoli all'adozione, come costi di acquisizione, limiti tecnici e la mancanza di economie di scala per grandi volumi, pongono sfide significative all'ampia diffusione.

In sintesi, la produzione additiva offre molteplici vantaggi, ma sfide come costi e velocità possono limitarne l'adozione su larga scala. La tecnologia è in continua evoluzione, e il suo impatto dipenderà dalla risoluzione di tali sfide nel tempo.

## 2 Supply chain per Additive Manufacturing

L'analisi della catena logistica per la produzione additiva (AM) riveste una rilevanza sempre maggiore nell'attuale panorama industriale, l'ampia propagazione delle tecnologie di stampaggio tridimensionale ha introdotto significative modifiche nelle dinamiche gestionali della catena di approvvigionamento [47] inaugurando un nuovo paradigma. Questo cambiamento ha suscitato un interesse crescente, poiché apporta vantaggi distintivi e solleva questioni peculiari rispetto alle tecniche tradizionali.

L'integrazione della produzione additiva (AM) nei processi di progettazione della catena di approvvigionamento rappresenta una scelta strategica fondamentale nell'ambito della quarta rivoluzione industriale che denota una nuova era industriale ed impiega le tecnologie digitali emergenti per aumentare la qualità, la produttività, la flessibilità e l'efficienza degli impianti produttivi [48]. Le evidenti potenzialità di queste metodologie hanno dimostrato di poter influenzare in modo significativo non solo le dinamiche delle catene di approvvigionamento, ma anche i processi produttivi e i prodotti stessi, rendendo possibile la fabbricazione di componenti più complessi con notevoli vantaggi dal punto di vista dei costi e tempi di consegna [47].

L'adozione dell'AM rappresenta una vera rivoluzione, andando oltre la semplice trasformazione del processo di progettazione, le implicazioni si estendono profondamente dall'interazione con il cliente, offrendo maggiore libertà di progettazione e prototipazione rapida all'evoluzione strutturale della catena di approvvigionamento, portando a una serie di vantaggi distintivi. I processi di produzione additiva non solo consentono

configurazioni decentralizzate più vicine ai consumatori ma introducono un nuovo paradigma con maggiore flessibilità nella logistica e gestione delle scorte, una migliore diffusione della personalizzazione di massa e una maggiore attenzione ai requisiti di sostenibilità e legali [47], [49]. L'integrazione dell'AM nella catena di approvvigionamento consente di concentrarsi sulla percentuale dei costi attribuiti al prodotto finito, promuovendo così notevoli miglioramenti alle prestazioni e significativi risparmi. Le imprese hanno l'opportunità di adottare la tecnologia in modo centralizzato o decentralizzato, adattandola alle proprie esigenze e alle caratteristiche specifiche del settore [50].

## **2.1 Tipologie di supply chain**

All'interno del panorama della produzione additiva (AM), la progettazione e la gestione della supply chain sono state ridefinite attraverso diverse configurazioni che rispondono alle esigenze specifiche delle imprese e del mercato. Le tipologie di supply chain si articolano in configurazioni centralizzate, decentralizzate, ad hub e domestiche, ciascuna con le proprie peculiarità e vantaggi.

### **2.1.1 Configurazione centralizzata**

La configurazione centralizzata della supply chain per la produzione additiva, (AM), come illustrato in *Figura 19* si caratterizza per la concentrazione delle attività chiave in un'unica posizione centrale con la consecutiva spedizione ai vari centri logistici [16]. In questo modello, il processo di realizzazione di componenti o pezzi finiti AM viene gestito principalmente presso la sede principale spesso situata in un'area geografica strategica.

Questa configurazione offre numerosi vantaggi, tra cui la massimizzazione dell'utilizzo delle attrezzature AM e il mantenimento di alti standard qualitativi, poiché tutte le attività sono supervisionate e controllate da un'unica entità [16].

La centralizzazione della richiesta proveniente dai diversi centri in un unico hub, dove l'investimento nella capacità delle macchine AM è utilizzato in modo efficiente, contribuisce a conseguire economie di scala, favorendo l'ottimizzazione delle risorse, tra cui materiali e attrezzature, consentendo un utilizzo più efficiente e una diminuzione dei costi unitari. Inoltre, la centralizzazione semplifica la gestione degli stock di materiale, riducendo il rischio di dispersione e sprechi [51].

Questo tipo di configurazione è particolarmente adatta per la realizzazione di lotti standardizzati, ripetitivi e quando il lead time non è un fattore critico [16].

Tuttavia, è importante considerare che questo approccio potrebbe comportare tempi di consegna più lunghi per i clienti distanti dal centro di produzione, limitazione della personalizzazione e vulnerabilità del sistema, in quanto un unico hub centrale è più vulnerabile a interruzioni o problemi operativi con potenziali impatti su tutta la catena di approvvigionamento.

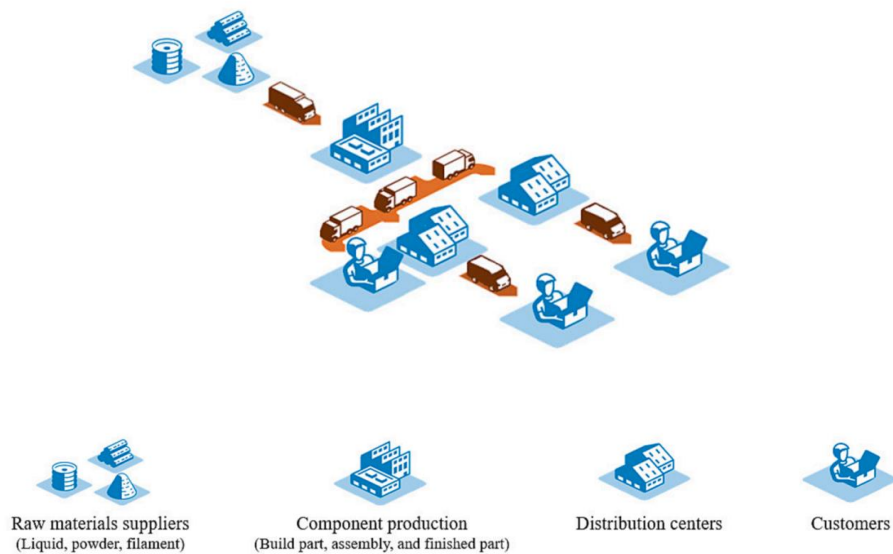


Figura 19: Configurazione AM centralizzata [16]

## 2.1.2 Configurazione decentralizzata

La configurazione decentralizzata della catena di approvvigionamento per l'Am, come si può evincere dalla Figura 20 un modello organizzativo che mira a sfruttare le potenzialità fabbricazione additiva distribuendo le attività operative su diverse sedi geografiche. In questo contesto, la produzione additiva viene implementata in centri locali, ognuno con la capacità di gestire autonomamente i processi di stampa e le risorse necessarie. Questo approccio innovativo propone di ottimizzare i benefici della produzione additiva, fornendo una maggiore flessibilità e una risposta più adattabile alle esigenze specifiche di ciascun luogo e cliente. La configurazione decentralizzata presenta una prospettiva dinamica e resiliente, consentendo la produzione locale di componenti complessi e personalizzati, tale modello organizzativo può facilitare la distribuzione dei prodotti in modo più rapido ed efficiente, riducendo i costi di trasporto, tempi di consegna, eliminando costi di stoccaggio e migliorando la soddisfazione del cliente [16], [47].



Da una ricerca condotta da Barz et al. (2016) è emerso che l'implementazione della tecnologia e la riconfigurazione dei siti produttivi in un contesto distribuito ha determinato una diminuzione dei costi di trasporto, oscillando tra un minimo del 43% e un massimo del 58%. Produrre un numero limitato di prodotti in diversi stabilimenti contribuisce a rendere la catena di approvvigionamento meno suscettibile a disastri e interruzioni; l'impatto non si estende più a livello nazionale o regionale, ma è circoscritto a un'unica sede operativa. [16].

Tuttavia, bisogna considerare che tale approccio potrebbe comportare maggiori costi operativi a causa della necessità di gestire multiple infrastrutture e risorse, rischi di coordinazione che possono esporre la catena di approvvigionamento a rischi di inefficienza dovuti a possibili problemi di coordinazione tra i vari nodi della rete, minore standardizzazione a favore di una maggiore flessibilità di personalizzazione con il rischio di compromettere l'efficienza e la coerenza nella qualità dei prodotti e complessità gestionale; coordinare le attività di produzione su diverse sedi può essere complesso, richiedendo un efficace sistema di gestione e controllo per garantire l'armonia tra i vari centri.

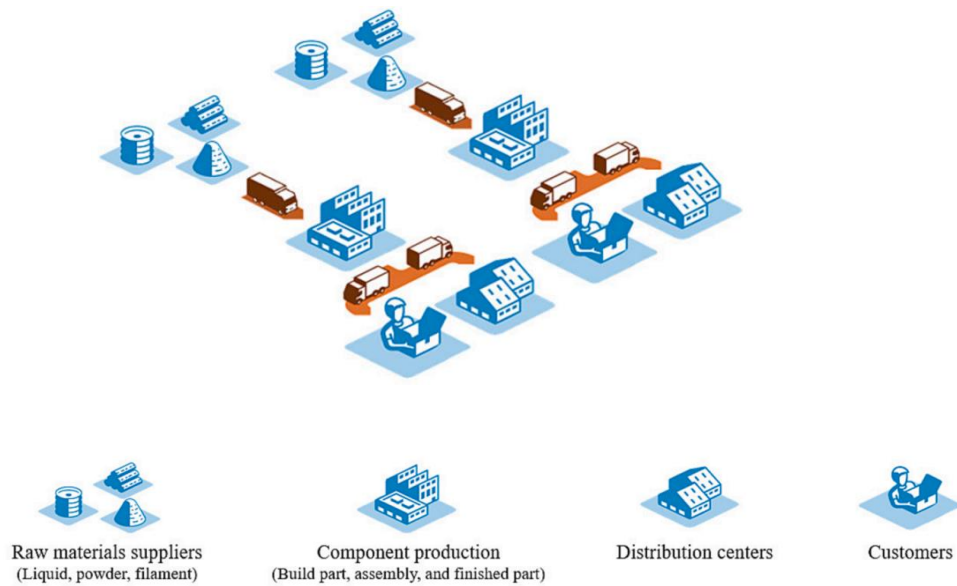


Figura 20: Configurazione AM decentralizzata[16]

### 2.1.3 Configurazione ad hub

In un contesto di produzione additiva, la configurazione ad hub rappresenta un mix tra una configurazione centralizzata ed una distribuita,

In questa configurazione gli hub, sono disposti in posizioni strategiche tra i siti di produzione principali e quelli locali, e i prodotti finiti sono depositati in diversi centri di stoccaggio più vicini al cliente finale [52].

La configurazione ad hub cerca di massimizzare i benefici di entrambi i mondi: da un lato, attinge ad alcune delle efficienze della produzione centralizzata quali una gestione più concentrata delle risorse richiedendo meno macchine e forza lavoro per soddisfare la domanda, una maggiore efficienza nella capacità produttiva puntando ad economie di scala; d'altro canto, offre vantaggi tipici della produzione decentralizzata, come tempi di consegna più veloci e costi di trasporto ridotti [52], [53].

In sintesi, cerca di ottimizzare l'intera catena di approvvigionamento, bilanciando i vantaggi della centralizzazione con quelli della decentralizzazione per garantire una produzione più efficiente, flessibile e adattabilità alle esigenze del mercato.

#### 2.1.4 Configurazione domestica

L'evoluzione della produzione additiva (AM) ha introdotto una configurazione di supply chain innovativa e altamente adattabile, nota come "Configurazione Domestica", questa configurazione rappresenta lo scenario più estremo tra quelli trattati, in cui il progressivo trasferimento verso valle degli impianti di produzione, raggiunge l'estremità più estrema della catena di approvvigionamento, ovvero il cliente finale [41].

Nel contesto della Configurazione Domestica, la produzione additiva non è più relegata a centri specializzati, ma si diffonde in modo capillare, integrando tali processi direttamente nei luoghi in cui i prodotti saranno utilizzati o consumati dai clienti finali, essi avranno modo di autoprodotte l'oggetto richiesto senza più farsi spedire prodotti fisici direttamente dalle aziende, bensì acquisiranno solo file CAD da autoprodotte mediante tecnologie presenti nelle proprie abitazioni [16], [41].

Questo avvicinamento fisico alla domanda finale comporta diversi vantaggi tra cui alta flessibilità di personalizzazione avendo i clienti la possibilità diretta di apportare delle personalizzazioni rispetto al modello standard, riduzione dei tempi di consegna poiché i file digitali possono essere inviati al cliente con un tempo quasi nullo e azzeramento dei costi di trasporto in quanto

essendo il prodotto finito realizzato direttamente a casa del cliente non vi sarà la necessità di essere spedito.

Pur offrendo vantaggi in termini di tempi di consegna e personalizzazione, l'adozione di una configurazione domestica rappresenta uno scenario altamente improbabile a causa delle sfide che presenta; l'implementazione di tecnologie AM direttamente nei siti di produzione richiede alti investimenti in attrezzature e competenze specifiche; pertanto, diventa essenziale condurre una valutazione accurata dei costi e dei benefici prima di considerare tale approccio [54].



Figura 21: Configurazione domestica / negozio 3d [16]

### 2.1.5 Confronto e tipologia più utilizzata

La scelta tra queste configurazioni dipende dalle esigenze specifiche dell'azienda, del prodotto e del mercato di riferimento; mentre la centralizzazione offre controllo ed efficienza [51], la decentralizzazione mira a massimizzare la flessibilità [16], [47]. L'approccio ad hub cerca di bilanciare entrambi [52],[53], mentre la configurazione domestica rappresenta un'estensione radicale anche se molto difficile da realizzare[54].

Non esiste una configurazione universale, ma la tendenza attuale sembra orientarsi verso una produzione locale decentralizzata.

Secondo uno studio condotto da Li et al. (2017) sulle emissioni di carbonio nei due differenti scenari, emerge chiaramente che in una catena di fornitura centralizzata, il 63,7% delle emissioni totali di carbonio è attribuibile alla produzione e approvvigionamento di materie prime di materie prime, percentuale che aumenta al 68,31% nel caso di una catena di fornitura decentralizzata. Nel contesto centralizzato, le emissioni di carbonio connesse alla produzione e al trasporto del prodotto finale rappresentano rispettivamente il 22,75% e il 13,55%, al contrario, nell'approccio decentralizzato, tali emissioni scendono rispettivamente al 22,42% e al 7,27% [55]. Questa analisi dettagliata conferma il ruolo significativo delle strutture decentralizzate nel contribuire a una riduzione sostanziale dell'impronta di carbonio complessiva della catena di fornitura nell'ambito della produzione additiva di pezzi di ricambio.

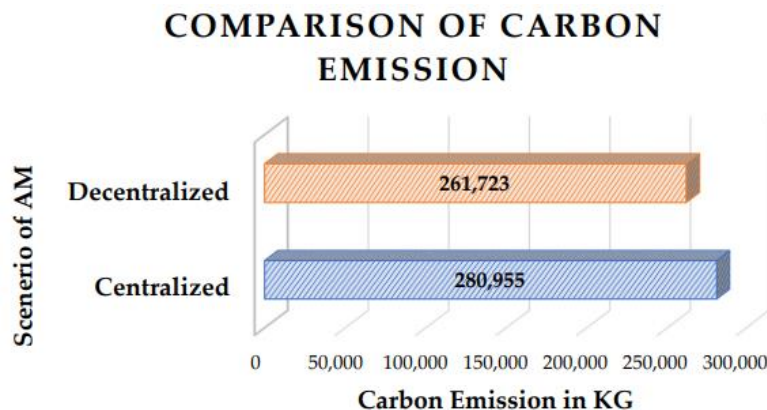


Figura 22: Confronto delle emissioni di carbonio nei due differenti scenari [56]

### 2.1.6 Algoritmi di allocazione

Nel contesto delineato, in cui si ha via via una preferenza per l'adozione di catene distribuite l'applicazione di modelli matematici emerge come un approccio fondamentale per ridurre al minimo i costi complessivi della supply

chain. Questi modelli si inseriscono in un quadro più ampio di strategie di ottimizzazione, mirando a migliorare l'efficienza operativa e a massimizzare i vantaggi derivanti dalla distribuzione geografica delle risorse produttive [43].

Gli obiettivi primari della progettazione di una supply chain distribuita includono la minimizzazione dei costi di trasporto, la gestione efficiente delle risorse produttive e la soddisfazione tempestiva della domanda del cliente.

L'integrazione di questi modelli matematici nella progettazione e gestione di una supply chain distribuita offre notevoli vantaggi; essi permettono di ottimizzare l'allocazione delle risorse, identificando la disposizione ottimale dei centri produttivi in base alla domanda del mercato e ai costi associati al trasporto e minimizzare i costi di trasporto, determinando i percorsi più efficienti per il trasferimento delle merci tra i diversi nodi della catena distribuita.

Questo processo viene definito "Location-Allocation" e si riferisce a un problema di ottimizzazione che coinvolge il posizionamento strategico di diverse strutture tra vari clienti al fine di minimizzare i costi di trasporto complessivi o il costo totale della catena di approvvigionamento. Questo problema, originariamente proposto da Cooper e ampiamente studiato da diversi ricercatori, consiste nel determinare le posizioni ottimali delle strutture in modo da supportare la domanda di un determinato insieme di clienti [43].

La prima fase coinvolge la suddivisione del territorio in base alla domanda dei clienti, identificando le diverse "location" che costituiranno i potenziali punti di produzione [57].

Uno dei problemi fondamentali per determinare l'allocazione dei centri è che spesso mancano dati per prevedere la domanda che spesso è incerta o soggetta a frequenti cambiamenti nel tempo, questa segmentazione mira a riflettere le variazioni della domanda in diverse aree geografiche, consentendo una distribuzione efficace e mirata delle risorse.

Successivamente, entra in gioco la fase di "allocation" mediante l'impiego di algoritmi matematici avanzati si determina la collocazione ottimale dei centri di produzione o distribuzione, tenendo conto di fattori cruciali come la distanza dai clienti, i costi di trasporto e la capacità produttiva.

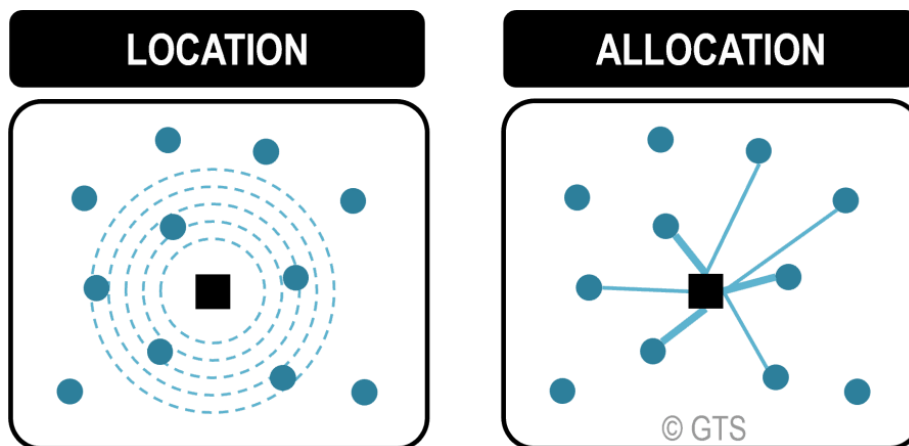


Figura 23: principio di Location Allocation [57]

Alcuni dei modelli matematici più diffusi ed utilizzati sono:

- **P-median:** L'algoritmo P-median, è progettato per determinare strategicamente il numero ottimale di centri di produzione e distribuzione (indicati come p) al fine di minimizzare la somma delle

distanze da ciascun cliente, fornitore o nodo critico nella catena di approvvigionamento alla struttura produttiva più vicina in modo da ridurre i costi totali della supply chain [43].

Il modello matematico si basa su una procedura iterativa, in cui in base ai  $P$  centri che si ha deciso di allocare si va a determinare la loro ubicazione; inizialmente, viene selezionata casualmente o in modo strategico e successivamente, l'algoritmo calcola le distanze da ciascun punto di servizio ai centri scelti e in base ai valori di distanza calcolati la posizione dei centri viene aggiornata per ridurre la somma delle distanze totali. Questo processo si ripete fino a quando si raggiunge una disposizione ottimale che minimizza le distanze complessive.

L'efficacia dell'algoritmo  $P$ -median risiede nella sua capacità di adattarsi a differenti scenari logistici; difatti modificando il valore di  $p$  è possibile regolare il numero di centri, consentendo una flessibilità che si adatta alle specifiche esigenze della supply chain, dimostrasi uno strumento dinamico ed efficiente per l'ottimizzazione dei costi

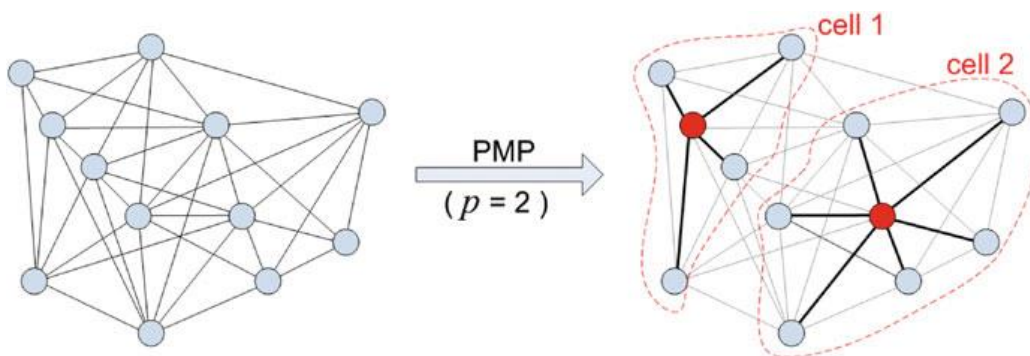


Figura 24: Esempio di allocazione di due centri di distribuzione con l'algoritmo  $P$ -median [58]



- **MILP (Programmazione Lineare Intera Mista):**

Il Mixed-Integer Linear Programming o comunemente detto MILP è un potente strumento matematico utilizzato per risolvere problemi complessi di ottimizzazione, come in questo caso la determinazione delle migliori posizioni per i centri di produzione o distribuzione in una catena di approvvigionamento. Questo modello è particolarmente adatto per affrontare le sfide logistiche nella fabbricazione additiva, per la sua precisione nella localizzazione delle risorse.

Il funzionamento del MILP comprende la formulazione di un insieme di equazioni e vincoli matematici che rappresentano il problema di ottimizzazione, nel nostro caso, il MILP viene utilizzato per minimizzare la somma delle distanze dai punti di servizio ai centri di produzione, garantendo al contempo che la collocazione dei centri sia rappresentata da variabili intere [43] ; ciò significa che il modello considera solo posizioni intere per i centri, garantendo che la collocazione sia rappresentata da posizioni fisiche reali. Il modello di formalizzazione del MILP esplora tutte le possibili soluzioni intere per identificare la configurazione ottimale dei centri che minimizza le distanze complessive; processo può comprendere diverse iterazioni, ma garantisce una soluzione ottimale in termini matematici.

Il punto di forza di questo algoritmo nella fabbricazione additiva risiede nella sua capacità di considerare molteplici variabili e vincoli complessi, adattandosi così alle esigenze specifiche della supply chain; infatti, andando a ridefinire le equazioni e i parametri del modello, è possibile personalizzarlo per ottimizzare gli aspetti specifici di cui si ha bisogno

In conclusione, l'applicazione di modelli matematici nella configurazione di una supply chain distribuita emerge come una strategia fondamentale per ridurre al minimo i costi complessivi della catena di approvvigionamento, garantendo al contempo un'elevata efficienza operativa e la massimizzazione dei benefici derivanti dalla distribuzione geografica delle risorse produttive.

## **2.2 Impatto sulle differenti fasi**

L'integrazione della produzione additiva (AM) nelle dinamiche aziendali costituisce una trasformazione che incide profondamente su molteplici fasi del flusso logistico e produttivo. L'AM, basata su tecnologie di stampa 3D, ha il potenziale di ridefinire l'approccio tradizionale nella gestione delle risorse e nella catena di fornitura. Esploriamo di seguito gli impatti chiave che questa innovazione può esercitare sulle fasi fondamentali della supply chain, dalla fornitura alla distribuzione, sottolineando come tali cambiamenti influenzino la competitività e l'efficienza complessiva nelle dinamiche gestionale delle imprese moderne.

### **2.2.1 Approvvigionamento**

Diversamente dalle catene tradizionali, l'AM richiede una varietà minore di materiali di input e di conseguenza minori fornitori in quanto le materie prime sono spesso standardizzate, semplificando le procedure di riordino dei materiali e gestione delle risorse, questa semplificazione consente un'aggregazione più efficiente dei flussi di merci, riducendo le scorte di sicurezza e i costi di trasporto delle materie prime [39]. Inoltre, la prospettiva di una catena di fornitura orientata al consumatore, dove i beni sono prodotti principalmente su richiesta del cliente, ha portato a una drastica riduzione

degli inventari in quanto la maggior parte dei materiali è tenuto sottoforma di materia prima, contribuendo ulteriormente alla gestione ottimizzata delle risorse[1]. La riprogettazione dei prodotti, focalizzata sulla semplificazione delle componenti attraverso l'utilizzo dell'AM, consente risparmi significativi nei costi di approvvigionamento, traducendosi in minori spese per l'acquisto di parti esterne, ma anche in una maggiore efficienza nei processi di produzione, con una minore necessità di cambi utensile e tempi di set-up più brevi [60].

L'implementazione dell'AM ha influenzato i rapporti all'interno della supply chain, uno studio condotto da [61] mostra la necessità di una maggiore collaborazione e una stretta relazione con i fornitori, specialmente quelli di materiali e software, divenuti elementi cruciali ; tale trasformazione riduce la dipendenza dai fornitori di componenti tradizionali, accentuando la rilevanza dei fornitori di materiali di base [61] .

### 2.2.2 Produzione

Tra tutte le fasi della supply chain il processo di produzione è tra quelli che è stato rivoluzionato maggiormente dall'introduzione dell'additive manufacturing difatti grazie al suo potenziale consente di abbattere le barriere legate ai costi di produzione tradizionali. La possibilità di fabbricare parti senza la necessità di costosi utensili specifici e la capacità di realizzare geometrie complesse ne consentono una maggiore flessibilità in fase di costruzione. La produzione di lotti più piccoli diventa economicamente vantaggiosa; i lunghi cicli di produzione tradizionale lasceranno spazio a cicli di produzione limitati e prodotti buil-to-order [5] eliminando la necessità di

impianti ad alto volume, contribuendo a eliminare la necessità di attrezzature specifiche per quantità limitate.

Inoltre, miglioramenti alla progettazione, come la riduzione del peso o una maggiore funzionalità, potrebbero ridurre i costi durante la fase di produzione [62].

L'applicazione di questa tecnologia può decentralizzare parte della produzione portando ad un ridimensionamento delle attività logistiche poiché la produzione può avvenire praticamente ovunque a costi competitivi, allontanandola dai paesi a basso costo del lavoro e avvicinandola direttamente ai consumatori, creando una connessione a livello mondiale ma, al contempo totalmente locale [5].

La stampa 3D consente la realizzazione di prodotti complessi in un'unica costruzione, riducendo il numero di fasi di produzione come le attività di assemblaggio e pre-assemblaggio, limitando il capitale investito in impianti e attrezzature produttive; implicando una semplificazione nella gestione dell'inventario, con la possibilità di produrre su richiesta, riducendo la necessità di grandi scorte di massa [4].

La manifattura tradizionale comporta la rimozione di materiale e la generazione di notevoli quantità di rifiuti, al contrario la tecnologia AM prevede l'uso solo del materiale strettamente necessario, eliminando praticamente gli sprechi di produzione favorendo un uso più efficiente dei materiali [5], [63].

Non possiamo però trascurare che l'introduzione dell'am porterebbe anche dei colli di bottiglia legati una bassa automazione, che congiunti a velocità di

costruzione ridotte, dimensioni limitate dei piatti di stampa, imprecisioni ed instabilità del processo come formazione di vuoti che incidono negativamente sulle proprietà meccaniche e portando ad anisotropia [64].

### 2.2.3 Distribuzione

L'adozione della stampa 3D ha trasformato il modo in cui le aziende concepiscono, producono e distribuiscono i loro prodotti portando efficienze nella fase di distribuzione del prodotto finito; la possibilità di posizionare centri di produzione locali in prossimità dei mercati principali riduce la dipendenza da reti logistiche globali, abbattendo i costi e tempi legati al trasporto di merci su lunghe distanze, inoltre, dal punto di vista ambientale la produzione locale contribuisce a una catena di fornitura più sostenibile, poiché riduce le emissioni associate ai trasporti su lunghe distanze e minimizza gli sprechi di materiali grazie alla produzione locale [65].

Un impatto cruciale riguarda il time-to-market, con questa nuova tecnologia si ha la possibilità di apportare modifiche progettuali in tempi notevolmente ridotti rispetto alle metodologie tradizionali consentendo una consegna più rapida dei prodotti sul mercato [5].

La minimizzazione del movimento dei materiali e la riduzione della necessità di confezionamento rappresentano un vantaggio distintivo, consentendo alla distribuzione di adottare in larga parte file digitali al posto dei tradizionali trasporti fisici di prodotti.

## 2.3 Impatto sulle prestazioni dell'Am in Supply chain

L'introduzione dell'Additive Manufacturing (AM) nella supply chain rappresenta una trasformazione radicale delle dinamiche tradizionali della

produzione, introducendo una serie di prestazioni che ridefiniscono gli standard operativi e contribuiscono alla ridefinizione del panorama industriale. Esaminiamo attentamente i principali impatti che porta questa nuova tipologia sulla supply chain:

- **Costi:** Il suo impatto distintivo si riflette nel minor uso e minimizzazione degli sprechi dei materiali di base utilizzando solo la quantità di materiale di cui si ha bisogno [64].

Nella produzione su misura l'AM è particolarmente vantaggioso per parti di piccole dimensioni, dove il costo dipende principalmente dal volume delle parti e dai correlati costi dei materiali di base. Ciò porta ad una riduzione dei costi di assemblaggio, dei costi di allestimento, dei costi energetici, dei costi di movimentazione delle materie prime, dei costi del personale, dei costi di imballaggio e dei costi dell'acqua, oltre a un'efficienza delle risorse migliorata [66].

- **Reattività:** La reattività è un aspetto critico in una supply chain moderna, l'AM emerge come catalizzatore della flessibilità operativa; la sua capacità di passare dalla progettazione alla produzione in tempi rapidi consente alle aziende di adattarsi con celerità alle mutevoli esigenze del mercato, accelerando il time-to-market e migliorando la capacità di risposta alle richieste del cliente [64]. La velocità di adattamento è un aspetto fondamentale per rimanere competitivi in un ambiente aziendale dinamico.
- **Affidabilità:** In termini di affidabilità, l'AM dimostra un'elevata precisione nella riproduzione di parti complesse, garantendo una qualità costante ed alte prestazioni. La tecnologia di produzione stratificata offre

un controllo dettagliato durante il processo di fabbricazione, minimizzando le variazioni dimensionali e assicurando la conformità agli standard di qualità. La possibilità di realizzazione di componenti in un unico pezzo, eliminando la necessità di assemblaggio, giunzione o saldatura può favorire la produzione di prodotti con standard qualitativi superiori [64].

- **Flessibilità:** La flessibilità, caratteristica essenziale nella gestione delle dinamiche della supply chain, è potenziata dall'AM attraverso la capacità di produrre componenti personalizzati e complessi senza dover rivoluzionare l'intero processo produttivo. Ciò consente una maggiore adattabilità alle richieste del mercato e alle specifiche dei clienti, garantendo una maggiore versatilità operativa.
- **Rischi:** Gli aspetti legati alla gestione dei rischi sono mitigati dalla diversificazione delle modalità di produzione offerta dall'AM, la produzione distribuita e la riduzione delle dipendenze da fornitori tradizionali contribuiscono a una maggiore resilienza operativa. Inoltre, l'AM consente di ridurre il rischio legato agli eccessi di inventario, favorendo un modello di produzione più orientato alla domanda effettiva.
- **Sostenibilità:** Infine, in un'era in cui la sostenibilità ambientale è al centro delle preoccupazioni globali, l'AM emerge come un alleato cruciale; la produzione additiva minimizza gli sprechi di materiale, riducendo l'impatto sull'ambiente. La capacità di produrre in loco contribuisce a una diminuzione dei trasporti di merci a lunga distanza, consentendo una reindustrializzazione dei paesi occidentali, piuttosto che dai paesi a basso salario [5], promuovendo modelli di produzione più sostenibili e in linea con le esigenze ambientali contemporanee.

## 3 Am per l'industria delle parti di ricambio

### 3.1 Introduzione e specifiche di settore

Nell'ecosistema industriale il settore dei pezzi di ricambio riveste un ruolo fondamentale, contribuendo in modo significativo al mantenimento e alla prolungata operatività di macchinari, veicoli e apparecchiature, influenzando direttamente la capacità di un'azienda di rispondere prontamente a eventuali guasti o necessità di manutenzione.

Questo ramo settoriale si dedica alla produzione e conseguente fornitura di componenti sostitutivi che richiedono necessarie soluzioni rapide; la fornitura tempestiva e affidabile di componenti sostitutivi è cruciale per garantire che impianti, macchinari e veicoli rimangano operativi, riducendo al minimo i tempi di inattività che potrebbero comportare costi significativi.

Nel 2015, il mercato globale dei pezzi di ricambio ha generato un fatturato complessivo di 9.078,8 milioni di dollari, raggiungendo 10.170,0 milioni di dollari nel 2020; questa crescita costante è solo un segnale iniziale delle prospettive positive di questo ramo industriale mercato [67].

Secondo le stime effettuate dal global market monitor (*Figura 25*) si prevede che entro il 2025 il mercato globale raggiungerà la cifra impressionante di 12.545,3 milioni di dollari, questi dati confermano chiaramente che il settore dei pezzi di ricambio è in costante espansione, offrendo opportunità significative per le aziende del mercato [67].



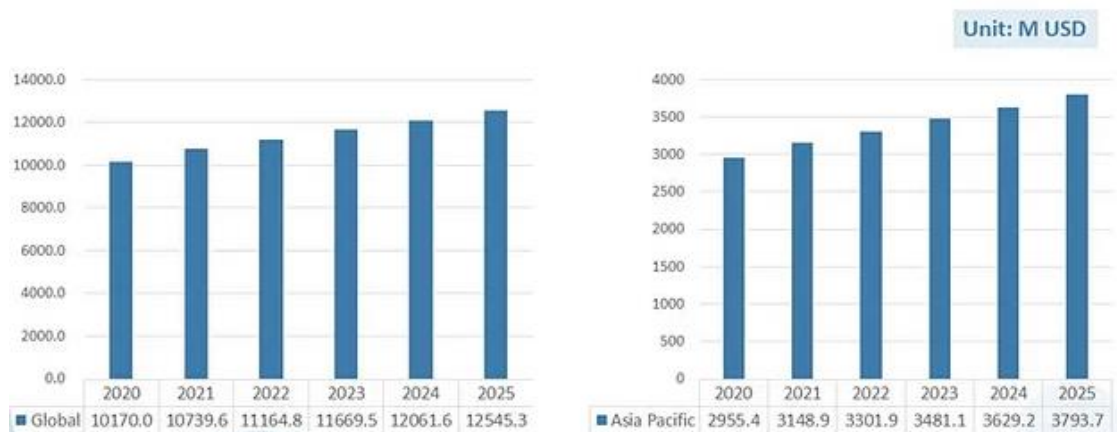
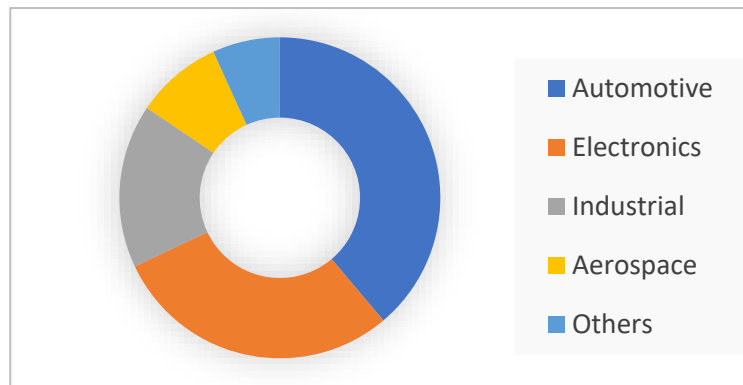


Figura 25: Previsioni del valore del mercato del settore dei pezzi di ricambio globale e asiatico [68]

Gli ambiti in cui il settore dei pezzi di ricambio trova applicazione sono vasti e includono (Figura 26) [69]:

- **Industria Manifatturiera:** In contesti industriali, la necessità di sostituire parti di macchinari è comune. Pezzi di ricambio come ingranaggi e componenti strutturali sono fondamentali per mantenere la continuità operativa degli impianti di produzione.
- **Automotive:** Nel settore automotive la disponibilità di pezzi di ricambio è essenziale per garantire la continuità operativa dei veicoli, la sicurezza stradale e la soddisfazione del cliente. Componenti meccanici, carrozzeria, sistemi elettronici e accessori rientrano tra i pezzi di ricambio più comuni.
- **Elettronica di Consumo:** Nel campo dell'elettronica di consumo, la fornitura di pezzi di ricambio è fondamentale per estendere la vita utile di dispositivi come smartphone, computer e elettrodomestici.
- **Settore Aerospaziale:** Nell'industria aerospaziale, la sicurezza è prioritaria. La disponibilità immediata di pezzi di ricambio critici è essenziale per mantenere l'efficienza e la sicurezza dei velivoli.



*Figura 26: Settori principali nel mercato dei pezzi di ricambio [69]*

Nei processi, la necessità di pezzi di ricambio può emergere per diverse ragioni, tra cui l'usura naturale, i guasti improvvisi o l'evoluzione tecnologica che richiede l'aggiornamento di componenti esistenti.

La complessità della catena di approvvigionamento e la necessità di mantenere ampie scorte, rappresentano solo alcune delle difficoltà intrinseche a questo processo; infatti, scorte eccessive possono generare costi elevati di obsolescenza e stoccaggio, mentre la mancanza di disponibilità tempestiva può causare fermi macchina prolungati e costosi. Inoltre, la produzione su larga scala e la distribuzione globale possono comportare tempi lunghi di produzione con una correlata dipendenza da una vasta rete di fornitori, aumentando il rischio di inefficienze logistiche e ritardi nella catena di approvvigionamento.

È importante suddividere i pezzi di ricambio in due differenti categorie: standard e non; il primo gruppo presenta una domanda prevedibile e costante ed è possibile organizzare piani di produzione con molto anticipo poiché tali parti richiedono una sostituzione a intervalli regolari in conformità con un programma di manutenzione prestabilito, mentre il secondo gruppo è

caratterizzato da una domanda più di nicchia, fluttuante ed imprevedibile e quindi di conseguenza molto più difficili da gestire [16]; la maggior parte dei pezzi in questo settore rientra in questo secondo gruppo e viene solitamente denominato a movimentazione lenta poiché sono necessari solo in casi sporadici.

Il mantenimento di scorte per questa categoria rappresenta un onere significativo per le aziende, sia in termini di obsolescenza che di capitale immobilizzato; in numerosi casi, le spese associate a magazzino e logistica risultano sproporzionate rispetto ai costi di *produzione* [16].

Affrontare queste inefficienze diventa cruciale per migliorare l'efficienza operativa; l'adozione di tecnologie all'avanguardia, come l'Additive Manufacturing (AM), offre un'interessante opportunità per superare le attuali restrizioni, riformulando le dinamiche operative e aprendo inedite prospettive. Questo innovativo approccio potrebbe radicalmente trasformare il settore industriale dei pezzi di ricambio

### **3.2 Tipologia di SC maggiormente utilizzata**

L'additive manufacturing ha superato il concetto di una tecnologia di nicchia, trasformandosi in una forza trainante nell'evoluzione dell'industria manifatturiera., in particolare nella gestione dei pezzi di ricambio. La capacità di creare pezzi complessi con una precisione senza precedenti e la flessibilità nel cambiare rapidamente il processo produttivo stanno ridefinendo le logiche tradizionali della produzione di componenti di ricambio. In questo scenario dinamico, la gestione della supply chain diventa cruciale per sfruttare appieno

il potenziale dell'additive manufacturing e garantire una risposta agile alle esigenze del mercato.

### 3.2.1 Confronto tra configurazioni

La tipologia della supply chain adottata gioca un ruolo fondamentale nel determinare l'efficienza, la flessibilità e la resilienza complessiva del sistema produttivo [70].

Le differenze tra una supply chain centralizzata e distribuita si traducono in scelte strategiche che influiscono su vari aspetti delle operazioni; in una supply chain centralizzata, come delineato nei capitoli precedenti i vantaggi chiave includono maggior controllo, economie di scala e minori investimenti di capitale in quanto si ha un unico sito di produzione. Dall'altra parte, la supply chain distribuita si distingue per la vicinanza al cliente, minori tempi di consegna, minori emissioni di CO2 e minori rischi di interruzione [56].

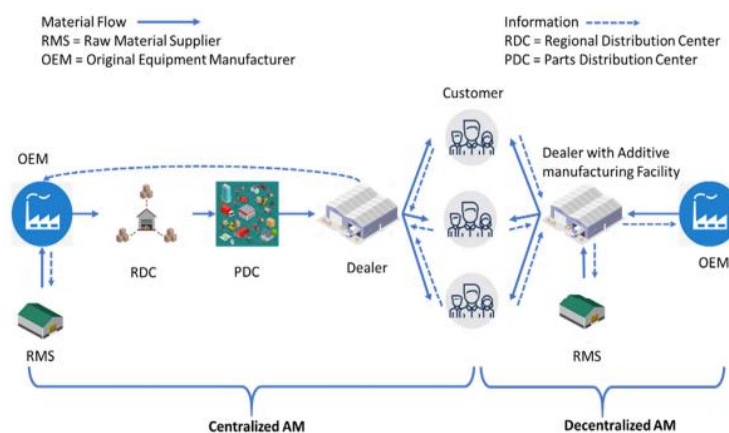


Figura 27: Illustrazione dei possibili scenari per l'industria dei pezzi di ricambio [70]

La situazione attuale evidenzia che, dal punto di vista dei costi per l'industria delle parti di ricambio come specificato in Figura 28, l'additive

manufacturing centralizzata è spesso vantaggiosa rispetto a quella decentralizzata a causa dei minori investimenti in attrezzatura e know-how; tuttavia, con l'implementazione di maggiore automazione, si prevede in un futuro che l'AM decentralizzata diventerà economicamente più vantaggiosa [1]. Questa inversione potrebbe rappresentare un cambiamento significativo nelle dinamiche dei costi, sottolineando la rapida evoluzione dell'industria.

AM machine Technology								
Attribute	Current Technology						Future Technology	
	SoA-SP		SoA-MP		SoA-2013		ReqTecDM	
	Centralized	Decentralized	Centralized	Decentralized	Centralized	Decentralized	Centralized	Decentralized
Material Cost	Same	Same	Same	Same	Same	Same	Same	Same
Spare parts transportation cost	High	Nil	High	Nil	High	Nil	High	Nil
Inventory carrying cost	High	Low	High	Low	High	Low	High	Low
Aircraft downtime cost	Low	High	Low	High	High	Low	High	Low
Annual cost of initial inventory production	High	Low	High	Low	High	Low	High	Low
Inventory obsolescence cost	High	Low	High	Low	High	Low	High	Low
Initial investment in AM machines, depreciation cost	Low	High	Low	High	Low	High	Low	High
Personnel cost	Low	High	Low	High	Low	High	Low	High
Total Cost	Lower	Higher	Lower	Higher	Lower	Higher	Higher	Lower

Figura 28: Comparazione dei costi di Supply chain nei differenti scenari di tecnologie Am [56]

### 3.3 Macrofasì nella gestione delle parti di ricambio

Nel panorama industriale contemporaneo, la gestione efficiente dei pezzi di ricambio si presenta come una sfida cruciale per i produttori originali (OEM) e i fornitori di servizi post-vendita. La crescente concorrenza, accompagnata dall'emergere di produttori "after-market" che offrono alternative più convenienti ma altrettanto performanti, ha spinto gli OEM a rivoluzionare le proprie strategie [71]. La risposta si è concentrata sul potenziamento dei servizi post-vendita, trasformando le parti di ricambio da meri costi a vere e proprie opportunità di business. Tradizionalmente percepite come una necessità, le parti di ricambio ora rappresentano un settore strategico,

fondamentale per garantire non solo la continuità operativa dei prodotti, ma anche fonti di ricavi stabili e proficui. Tuttavia, la gestione di queste parti presenta sfide rilevanti, soprattutto per quelle a movimentazione lenta, caratterizzate da domanda intermittente o basso valore.

Le difficoltà nell'ottimizzazione della gestione delle parti di ricambio influenzano direttamente le logiche di gestione del magazzino e delle operazioni logistiche; la necessità di assicurare tempi di fornitura rapidi, impone alle aziende di mantenere elevate scorte, generando eccessi di magazzino e il potenziale rischio di obsolescenza [71].

La molteplicità dei limiti correlati alla produzione sottrattiva ha portato alla ridefinizione dei processi mediante l'introduzione dell'Am e di un nuovo flusso operativo. La *figura 27* presenta le nuove principali macrofasi concepite per soddisfare la richiesta di un cliente che ha la necessità di una parte di ricambio.

La prima fase è rappresentata dalla Digitalizzazione, in seguito alla domanda da parte del cliente di un determinato pezzo si dovrà passare dal trasferimento della geometria dal mondo fisico a quella digitale ed esso può avvenire mediante due alternative: è possibile acquisire la geometria dell'oggetto mediante tecniche tradizionali di misurazione e successivamente costruire il modello CAD, oppure il progettista industriale può optare per la digitalizzazione della parte mediante l'impiego di tecniche di reverse engineering.

La prima opzione è preferibile quando si tratta di oggetti con una geometria relativamente semplice, convenzionale e di facile disegno mentre il secondo per geometria più complesse e articolate.

Una volta ottenuta una digitalizzazione del modello si passa alla riprogettazione secondo i requisiti della stampa 3d. In questa fase, il design delle parti di ricambio viene ottimizzato per sfruttare al massimo le potenzialità della manifattura additiva, favorendo la produzione di componenti più leggeri, complessi e ad alte prestazioni.

Nel terzo step si passa alla fase di determinazione della tipologia di Am che più si presta alle caratteristiche che deve quel pezzo, e la successiva produzione.

È necessario effettuare una selezione tra le macchine disponibili nella propria catena di centri distribuiti quelle in grado di soddisfare i requisiti definiti nelle fasi precedenti. Nel caso in cui nessuna di esse risponda a tali requisiti, è indispensabile apportare correzioni al progetto fino a individuare una soluzione adeguata. Se più di una macchina risulta idonea, il criterio di selezione può orientarsi verso la minimizzazione dei costi di stampa e logistici, magari considerando la distanza dal cliente al centro di stampa selezionato per la produzione [71].

Prima di valutare gli aspetti economici, è imperativo però che la tecnologia per cui si ha optato abbia raggiunto una maturità adeguata a garantire il successo e la qualità del processo; da un punto di vista tecnologico, possono emergere limitazioni relative a tolleranze geometriche, dimensionali e dei

finitura superficiale dei prodotti ottenuti con il processo di produzione scelto [71].

Infine, dopo aver prodotto, rifinito e controllato che non vi siano in conformità si passa all'ultima fase dove i nuovi pezzi prodotti sono pronti per essere consegnati direttamente al cliente.

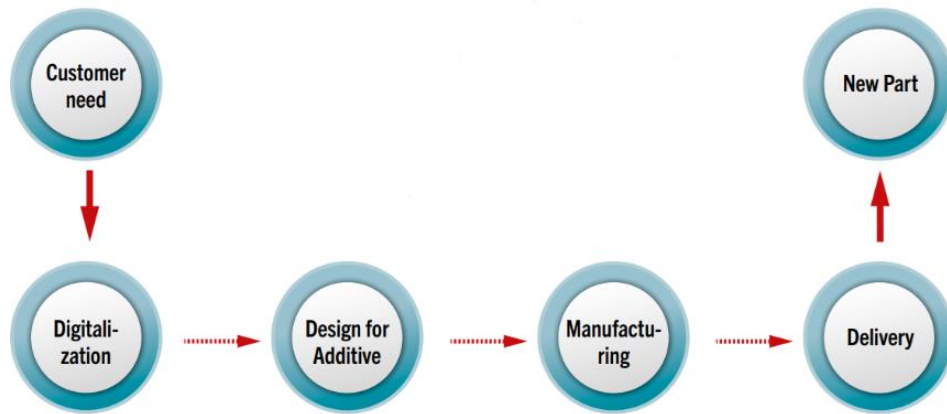


Figura 29: Macrofasi per la richiesta di un pezzo di ricambio [71]



## Conclusione

In conclusione, l'analisi sull'impiego dell'Additive Manufacturing (AM) nella gestione della catena di approvvigionamento rivela un importante cambiamento nell'ambito della produzione e della logistica aziendale. In questo elaborato, si è esplorato l'impatto dell'Additive Manufacturing su diversi elementi critici della supply chain, mettendo in luce le sue potenzialità e le sfide connesse.

L'Additive Manufacturing si distingue come una tecnologia capace di trasformare il modo in cui progettiamo, produciamo e distribuiamo i prodotti. La sua capacità di creare oggetti complessi in modo efficiente, personalizzato e spesso più sostenibile apre nuove prospettive nella produzione su scala industriale.

La flessibilità offerta dall'Additive Manufacturing riduce la dipendenza da processi tradizionali, consentendo una maggiore adattabilità alle esigenze del mercato; la produzione on-demand, la personalizzazione di massa e la riduzione degli sprechi sono solo alcune delle potenzialità che l'AM offre alla catena di approvvigionamento.

Tuttavia, è importante considerare e affrontare le sfide legate a questa tecnologia, come la bassa automazione, la velocità e il volume di stampa ridotti, gli alti costi iniziali e la varietà limitata di materie prime, per permetterne una integrazione più diffusa e di successo.

La scelta tra le varie configurazioni della catena di approvvigionamento dipende dalle esigenze specifiche dell'azienda, del prodotto e del mercato di

riferimento però si è evidenziata una tendenza verso l'adozione di una catena decentralizzata.

In definitiva, l'Additive Manufacturing, apre a nuove opportunità di efficienza, sostenibilità e innovazione; per sfruttare appieno su tali vantaggi, le imprese dovranno adottare strategie in grado di massimizzare il potenziale dell'AM all'interno della complessa rete di approvvigionamento e distribuzione

## Bibliografia/ Sitografia

- [1] D. Thomas, «Costs, benefits, and adoption of additive manufacturing: a supply chain perspective», *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 85, pp. 1857–1876, 2016.
- [2] «Additive manufacturing: cos'è e come funziona la manifattura additiva», Internet4Things. Consultato: 28 dicembre 2023. [Online]. Disponibile su: <https://www.internet4things.it/iot-library/che-cose-il-3d-printing-e-come-si-colloca-nellambito-industry-4-0-e-iot/>
- [3] 3D-RAM, «COS'È L' ADDITIVE MANUFACTURING». Consultato: 28 dicembre 2023. [Online]. Disponibile su: <http://localhost/blog/?cos-e-l--additive-manufacturing>
- [4] A. K. and J. Sciacchitano, «How 3-D Printing Could Disrupt Your Supply Chain», IndustryWeek. Consultato: 2 gennaio 2024. [Online]. Disponibile su: <https://www.industryweek.com/supply-chain/procurement/article/21278692/what-are-automakers-doing-to-cut-scope-1-3-emissions>
- [5] M. Attaran, «Additive manufacturing: the most promising technology to alter the supply chain and logistics», *J. Serv. Sci. Manag.*, vol. 10, fasc. 03, p. 189, 2017.
- [6] R. Janssen, I. Blankers, E. Moolenburgh, e B. Posthumus, «TNO: The impact of 3-D printing on supply chain management», *Hague Neth. TNO*, vol. 28, p. 24, 2014.
- [7] Mecalux, «Supply chain: cos'è e come funziona la catena di approvvigionamento». Consultato: 28 dicembre 2023. [Online]. Disponibile su: <https://www.mecalux.it/blog/supply-chain-cos-e>
- [8] A. Friedrich, A. Lange, e R. Elbert, «Supply chain design for industrial additive manufacturing», *Int. J. Oper. Prod. Manag.*, vol. 42, fasc. 11, pp. 1678–1710, gen. 2022, doi: 10.1108/IJOPM-12-2021-0802.

- [9] «Supply chain: cos'è e come funziona», Inside Marketing. Consultato: 28 dicembre 2023. [Online]. Disponibile su: <https://www.insidemarketing.it/glossario/definizione/supply-chain/>
- [10] SalvatoreOrlando, «Breve storia della produzione additiva», Orlando Salvatore. Consultato: 2 gennaio 2024. [Online]. Disponibile su: <https://orlandosalvatore.net/2016/12/07/breve-storia-della-produzione-additiva/>
- [11] «Produzione additiva», *Wikipedia*. 30 gennaio 2021. Consultato: 28 dicembre 2023. [Online]. Disponibile su: [https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Produzione\\_additiva&oldid=118338048](https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Produzione_additiva&oldid=118338048)
- [12] «(PDF) 3D Printing: Downstream Production Transforming the Supply Chain». Consultato: 3 febbraio 2024. [Online]. Disponibile su: [https://www.researchgate.net/publication/319098991\\_3D\\_Printing\\_Downstream\\_Production\\_Transforming\\_the\\_Supply\\_Chain?\\_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6Ii9kaXJlY3QiLCJwYWdlIjojX2RpcmVjdCJ9fQ](https://www.researchgate.net/publication/319098991_3D_Printing_Downstream_Production_Transforming_the_Supply_Chain?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6Ii9kaXJlY3QiLCJwYWdlIjojX2RpcmVjdCJ9fQ)
- [13] M. Kunovjanek, N. Knofius, e G. Reiner, «Additive manufacturing and supply chains—a systematic review», *Prod. Plan. Control*, vol. 33, fasc. 13, pp. 1231–1251, 2022.
- [14] «Additive manufacturing, che cos'è e perché ora piace anche al venture capital - Economyup». Consultato: 31 gennaio 2024. [Online]. Disponibile su: <https://www.economyup.it/innovazione/additive-manufacturing-che-cose-e-perche-ora-piace-anche-al-venture-capital/>
- [15] U. marketing, «Additive manufacturing: cos'è la produzione additiva e come funziona la stampa 3D», Ridix. Consultato: 28 dicembre 2023. [Online]. Disponibile su: <https://www.ridix.it/blog/approfondimenti/additive-manufacturing-cosa-e/>

- [16] F. Calignano e V. Mercurio, «An overview of the impact of additive manufacturing on supply chain, reshoring, and sustainability», *Clean. Logist. Supply Chain*, vol. 7, p. 100103, giu. 2023, doi: 10.1016/j.clscn.2023.100103.
- [17] STUFFCUBE1, «stampa 3D, come si fa.», StuffCube. Consultato: 3 febbraio 2024. [Online]. Disponibile su: <https://stuffcube.wordpress.com/2020/06/08/stampa-3d-come-si-fa/>
- [18] F. Puzello, «Additive-Manufacturing:manifattura additiva cos'è come funziona», 3D 4Growth. Consultato: 28 dicembre 2023. [Online]. Disponibile su: <https://3d4growth.com/additive-manufacturing>
- [19] L. inc, «COS'È IL REVERSE ENGINEERING?», Creaform's Blog - News, Tips & Tricks about 3D technologies, 3D Scanning, QC/Inspection, Reverse Engineering & More. Consultato: 28 dicembre 2023. [Online]. Disponibile su: <https://www.creaform3d.com/blog/it/cose-il-reverse-engineering/>
- [20] «Reverse Engineering». Consultato: 21 gennaio 2024. [Online]. Disponibile su: <http://www.plastikdesign.it/reverse-engineering>
- [21] «Cos'è un file STL? | 3D Systems». Consultato: 28 dicembre 2023. [Online]. Disponibile su: <https://it.3dsystems.com/quickparts/learning-center/what-is-stl-file>
- [22] «Slicing», *Wikipedia*. 6 maggio 2023. Consultato: 2 gennaio 2024. [Online]. Disponibile su: <https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Slicing&oldid=133362912>
- [23] T. Kerr e S. Barrett, «Introduction to Low-Cost 3D Printing», in *Arduino IV: DIY Robots: 3D Printing, Instrumentation, and Control*, T. Kerr e S. Barrett, A c. di, in *Synthesis Lectures on Digital Circuits & Systems*. , Cham: Springer International Publishing, 2022, pp. 51–99. doi: 10.1007/978-3-031-11209-6\_2.
- [24] T. Polygenis, «The Ultimate Guide to 3D Printing Post-Processing Techniques». Consultato: 2 gennaio 2024. [Online]. Disponibile su:

<https://www.wevolver.com/article/the-ultimate-guide-to-3d-printing-post-processing-techniques>

- [25] A. Diniță, A. Neacșa, A. I. Portoacă, M. Tănase, C. N. Ilinca, e I. N. Ramadan, «Additive Manufacturing Post-Processing Treatments, a Review with Emphasis on Mechanical Characteristics», *Materials*, vol. 16, fasc. 13, Art. fasc. 13, gen. 2023, doi: 10.3390/ma16134610.
- [26] «Stampa 3D», *Wikipedia*. 13 dicembre 2023. Consultato: 29 dicembre 2023. [Online]. Disponibile su: [https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Stampa\\_3D&oldid=136876114](https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Stampa_3D&oldid=136876114)
- [27] J. V. Silva e R. A. Rezende, «Additive Manufacturing and its future impact in logistics», *IFAC Proc. Vol.*, vol. 46, fasc. 24, pp. 277–282, 2013.
- [28] «Estrusione di materiale», Dassault Systèmes. Consultato: 29 dicembre 2023. [Online]. Disponibile su: <https://www.3ds.com/it/make/guide/process/material-extrusion>
- [29] «Material Jetting», Dassault Systèmes. Consultato: 30 dicembre 2023. [Online]. Disponibile su: <https://www.3ds.com/it/make/guide/process/material-jetting>
- [30] «3D CAD | Computer-Aided Design Software | Siemens», Siemens Digital Industries Software. Consultato: 17 febbraio 2024. [Online]. Disponibile su: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/our-story/glossary/vat-photopolymerization/53338>
- [31] M. Pagac *et al.*, «A Review of Vat Photopolymerization Technology: Materials, Applications, Challenges, and Future Trends of 3D Printing», *Polymers*, vol. 13, fasc. 4, Art. fasc. 4, gen. 2021, doi: 10.3390/polym13040598.
- [32] «Photopolymerization», Dassault Systèmes. Consultato: 11 febbraio 2024. [Online]. Disponibile su: <https://www.3ds.com/make/guide/process/photopolymerization>

- [33] «Stampa 3D», Dassault Systèmes. Consultato: 3 febbraio 2024. [Online].  
Disponibile su: <https://www.3ds.com/it/make/guide/process/3d-printing>
- [34] N. A, «Direct Energy Deposition (DED): tutto quello che c'è da sapere», 3Dnatives. Consultato: 29 dicembre 2023. [Online]. Disponibile su: <https://www.3dnatives.com/it/direct-energy-deposition-stampa-3d-100920219/>
- [35] «Sheet Lamination | Siemens Software», Siemens Digital Industries Software. Consultato: 17 febbraio 2024. [Online]. Disponibile su: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/our-story/glossary/sheet-lamination/55512>
- [36] «What is Sheet Lamination?», Engineering Product Design. Consultato: 11 febbraio 2024. [Online]. Disponibile su: <https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/sheet-lamination/>
- [37] M. Ziaee e N. B. Crane, «Binder jetting: A review of process, materials, and methods», *Addit. Manuf.*, vol. 28, pp. 781–801, ago. 2019, doi: 10.1016/j.addma.2019.05.031.
- [38] «Binder Jetting», Dassault Systèmes. Consultato: 11 febbraio 2024. [Online]. Disponibile su: <https://www.3ds.com/it/make/guide/process/binder-jetting>
- [39] C. F. Durach, S. Kurpjuweit, e S. M. Wagner, «The impact of additive manufacturing on supply chains», *Int. J. Phys. Distrib. Logist. Manag.*, vol. 47, fasc. 10, pp. 954–971, 2017.
- [40] W. E. King *et al.*, «Observation of keyhole-mode laser melting in laser powder-bed fusion additive manufacturing», *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 214, fasc. 12, pp. 2915–2925, dic. 2014, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2014.06.005.
- [41] «La Stampa 3D rivoluziona la Logistica: dai ricambi in giornata alla produzione “a domicilio”», Digital4. Consultato: 2 gennaio 2024. [Online]. Disponibile su:

<https://www.digital4.biz/supply-chain/la-stampa-3d-rivoluziona-la-logistica-dai-ricambi-giornata-alla-produzione-domicilio/>

- [42] M. Jiménez, L. Romero, I. A. Domínguez, M. del M. Espinosa, e M. Domínguez, «Additive Manufacturing Technologies: An Overview about 3D Printing Methods and Future Prospects», *Complexity*, vol. 2019, p. e9656938, feb. 2019, doi: 10.1155/2019/9656938.
- [43] F. M. de Brito, G. da Cruz, E. M. Frazzon, J. P. T. V. Basto, e S. G. S. Alcalá, «Design approach for additive manufacturing in spare part supply chains», *IEEE Trans. Ind. Inform.*, vol. 17, fasc. 2, pp. 757–765, 2020.
- [44] Redazione, «Additive Manufacturing: differenze rispetto alle tecnologie convenzionali», *Vehicle CuE | Close-up Engineering*. Consultato: 3 febbraio 2024. [Online]. Disponibile su: <https://vehiclecue.it/additive-manufacturing-differenze-tecnologie-convenzionali/34463/>
- [45] S. H. Khajavi, J. Partanen, J. Holmström, e J. Tuomi, «Risk reduction in new product launch: A hybrid approach combining direct digital and tool-based manufacturing», *Comput. Ind.*, vol. 74, pp. 29–42, dic. 2015, doi: 10.1016/j.compind.2015.08.008.
- [46] «Analysis of rapid manufacturing—using layer manufacturing processes for production - N Hopkinson, P Dicknes, 2003». Consultato: 3 gennaio 2024. [Online]. Disponibile su: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1243/095440603762554596>
- [47] M. Rinaldi, M. Caterino, P. Manco, M. Fera, e R. Macchiaroli, «The impact of Additive Manufacturing on Supply Chain design: a simulation study», *Procedia Comput. Sci.*, vol. 180, pp. 446–455, 2021.
- [48] A. G. Frank, L. S. Dalenogare, e N. F. Ayala, «Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies», *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 210, pp. 15–26, apr. 2019, doi: 10.1016/j.ijpe.2019.01.004.



- [49] D. R. T. Velázquez, A. T. Simon, A. L. Helleno, e L. H. Mastrapa, «Implications of additive manufacturing on supply chain and logistics», *Indep. J. Manag. Prod.*, vol. 11, fasc. 4, pp. 1279–1302, 2020.
- [50] J. Holmström, J. Partanen, J. Tuomi, e M. Walter, «Rapid manufacturing in the spare parts supply chain: Alternative approaches to capacity deployment», *J. Manuf. Technol. Manag.*, vol. 21, fasc. 6, pp. 687–697, gen. 2010, doi: 10.1108/17410381011063996.
- [51] D. R. Eyers e A. T. Potter, «E-commerce channels for additive manufacturing: an exploratory study», *J. Manuf. Technol. Manag.*, vol. 26, fasc. 3, pp. 390–411, gen. 2015, doi: 10.1108/JMTM-08-2013-0102.
- [52] S. Gallinaro, «Additive Manufacturing-Based Supply Chain Configurations», in *Advances in 3D Printing*, IntechOpen, 2023. doi: 10.5772/intechopen.110174.
- [53] S. H. Khajavi, J. Holmström, e J. Partanen, «Additive manufacturing in the spare parts supply chain: hub configuration and technology maturity», *Rapid Prototyp. J.*, vol. 24, fasc. 7, pp. 1178–1192, gen. 2018, doi: 10.1108/RPJ-03-2017-0052.
- [54] M. Bogers, R. Hadar, e A. Bilberg, «Additive manufacturing for consumer-centric business models: Implications for supply chains in consumer goods manufacturing», *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 102, pp. 225–239, gen. 2016, doi: 10.1016/j.techfore.2015.07.024.
- [55] Y. Li, G. Jia, Y. Cheng, e Y. Hu, «Additive manufacturing technology in spare parts supply chain: a comparative study», *Int. J. Prod. Res.*, vol. 55, fasc. 5, pp. 1498–1515, 2017.
- [56] M. Kalender, S. E. Kılıç, S. Ersoy, Y. Bozkurt, e S. Salman, «Additive Manufacturing and 3D Printer Technology in Aerospace Industry», in *2019 9th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST)*, giu. 2019, pp. 689–694. doi: 10.1109/RAST.2019.8767881.

- [57] «A.9 – Location-Allocation Models | The Geography of Transport Systems». Consultato: 3 febbraio 2024. [Online]. Disponibile su: <https://transportgeography.org/contents/methods/location-allocation-models/>
- [58] «Fig. 3.2 The p-median problem: minimize the total weight of solid edges», ResearchGate. Consultato: 31 gennaio 2024. [Online]. Disponibile su: [https://www.researchgate.net/figure/The-p-median-problem-minimize-the-total-weight-of-solid-edges\\_fig7\\_316800984](https://www.researchgate.net/figure/The-p-median-problem-minimize-the-total-weight-of-solid-edges_fig7_316800984)
- [59] W. J. Hopp e M. L. Spearman, *Factory Physics: Third Edition*. Waveland Press, 2011.
- [60] C. Tuck, R. Hague, e N. Burns, «Rapid manufacturing: impact on supply chain methodologies and practice», *Int. J. Serv. Oper. Manag.*, vol. 3, fasc. 1, p. 1, 2007, doi: 10.1504/IJSOM.2007.011459.
- [61] I. Kothman e N. Faber, «How 3D printing technology changes the rules of the game Insights from the construction sector», *J. Manuf. Technol. Manag.*, vol. 27, fasc. 7, pp. 932–943, 2016, doi: 10.1108/JMTM-01-2016-0010.
- [62] S. Zanoni, M. Ashourpour, A. Bacchetti, M. Zanardini, e M. Perona, «Supply chain implications of additive manufacturing: a holistic synopsis through a collection of case studies», *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 102, fasc. 9, pp. 3325–3340, giu. 2019, doi: 10.1007/s00170-019-03430-w.
- [63] A. Ghadge, G. Karantoni, A. Chaudhuri, e A. Srinivasan, «Impact of additive manufacturing on aircraft supply chain performance: A system dynamics approach», *J. Manuf. Technol. Manag.*, vol. 29, fasc. 5, pp. 846–865, gen. 2018, doi: 10.1108/JMTM-07-2017-0143.
- [64] V. Verboeket e H. Krikke, «The disruptive impact of additive manufacturing on supply chains: A literature study, conceptual framework and research agenda», *Comput. Ind.*, vol. 111, pp. 91–107, 2019.

- [65] «The 3D-Printed Car That Will Drive Across the Country», Popular Mechanics. Consultato: 6 gennaio 2024. [Online]. Disponibile su: <https://www.popularmechanics.com/cars/a9645/urbee-2-the-3d-printed-car-that-will-drive-across-the-country-16119485/>
- [66] M. Walter, J. Holmström, e H. Yrjölä, «Rapid manufacturing and its impact on supply chain management», *Proc. Logist. Res. Netw. Annu. Conf. Dublin Irel.*, gen. 2004.
- [67] Quella, «Global Spare Parts Industry Market Size Analysis and Forecast Under the Influence of COVID-19...», Medium. Consultato: 21 gennaio 2024. [Online]. Disponibile su: <https://quella-19619.medium.com/global-spare-parts-industry-market-size-analysis-and-forecast-under-the-influence-of-covid-19-66b7d1fac786>
- [68] «Global Market Monitor - Business Consultancy, Customized Research-REPORTS». Consultato: 21 gennaio 2024. [Online]. Disponibile su: <https://www.globalmarketmonitor.com/plus/list.php?tid=1>
- [69] T. <https://www.technavio.com>, «Spare Parts Logistics Market Size, Share, Growth, Trends, Industry Analysis Forecast 2027». Consultato: 22 gennaio 2024. [Online]. Disponibile su: <https://www.technavio.com/report/spare-parts-logistics-market-industry-analysis>
- [70] B. Debnath, M. S. Shakur, F. Tanjum, M. A. Rahman, e Z. H. Adnan, «Impact of Additive Manufacturing on the Supply Chain of Aerospace Spare Parts Industry—A Review», *Logistics*, vol. 6, fasc. 2, 2022, doi: 10.3390/logistics6020028.
- [71] M. Rossoni, «PARTI DI RICAMBIO: UN’OPPORTUNITÀ CHIAMATA», 2020.

## Elenco figure

Figura 1: Parole più diffuse nei testi individuati.....	5
Figura 2: differenti fasi della Supply Chain [9] .....	10
Figura 3: Differenza tra Additive Manufacturing e Subtractive Manufacturing [12].....	12
Figura 4: grafico crescita del mercato dell'additive manufacturing [14] .....	12
Figura 5: Fasi di processo stampa 3d [17] .....	14
Figura 6: fasi del reverse engineering [20] .....	16
Figura 7: Conversione file in Stl [21] .....	17
Figura 8: Slicing di un modello 3d [23].....	18
Figura 9: Processo di Material Extrusion [28] .....	22
Figura 10: Processo di Material Jetting [29].....	23
Figura 11: Processo di Vat Photopolymerization [32] .....	24
Figura 12: processo di Sinterizzazione laser selettiva [33].....	25
Figura 13: Processo di deposizione diretta di energia con l'uso di fascio di elettroni [34].....	26
Figura 14: Processo di Sheet lamination [36] .....	27
Figura 15: Processo di Binder Jetting [38].....	28
Figura 16: Ranking di importanza per le principali tecnologie per AM [39]. .....	30
Figura 17: principali settori in cui viene adottata l'AM (Vafadar et al., 2021) .....	33
Figura 18: confronto di costi di produzione tra metodo tradizionale e additivo [44] .....	34
Figura 19: Configurazione AM centralizzata [16] .....	39
Figura 20: Configurazione AM decentralizzata[16] .....	41

Figura 21: Configurazione domestica / negozio 3d [16].....	43
Figura 22:Confronto delle emissioni di carbonio nei due differenti scenari [56].....	44
Figura 23: principio di Location Allocation [57].....	46
Figura 24:Esempio di allocazione di due centri di distribuzione con l’algoritmo P-median [58].....	47
Figura 25: Previsioni del valore del mercato del settore dei pezzi di ricambio globale e asiatico [68].....	56
Figura 26: Settori principali nel mercato dei pezzi di ricambio [69].....	57
Figura 27: Illustrazione dei possibil scenari per l'industria dei pezzi di ricambio [70].....	59
Figura 28: Comparazione dei costi di Supply chain nei differenti scenari di tecnologie Am [56].....	60
Figura 29: Macrofasi per la richiesta di un pezzo di ricambio [71].....	63

## **Ringraziamenti**

Al termine di questo elaborato, ritengo opportuno dedicare uno spazio di riconoscenza a tutte le persone che, con il loro sostegno, hanno contribuito a rendere significativo questo percorso universitario.

Innanzitutto, desidero esprimere il mio riconoscimento alla Prof.ssa Arianna Alfieri, la mia relatrice, che con competenza ha guidato la stesura di questo lavoro. Un ringraziamento altrettanto importante è rivolto alla Prof.ssa Erica Pastore, il cui contributo come correlatrice è stato fondamentale per la redazione e completamento di questo elaborato.

Ai miei genitori, Laretta ed Alessandro e a mio fratello Emanuele, va il mio sincero ringraziamento per essere stati una costante fonte di ispirazione e supporto durante questi anni, il loro aiuto e affetto mi ha aiutato e motivato per portare a termine questo lungo e difficile percorso formativo

Desidero esprimere la mia profonda gratitudine alla persona più speciale della mia vita, la mia fidanzata Veronica, per il suo costante e incondizionato amore, supporto e comprensione.

Un particolare riconoscimento va anche ai miei colleghi di corso che hanno condiviso con me le gioie e sfide la loro presenza e incoraggiamento hanno reso questa esperienza ancor più significativa.

Infine, ringrazio di cuore tutti coloro che, in vario modo, hanno contribuito al mio percorso accademico permettendomi il raggiungimento di questo importante traguardo.

Grazie di cuore a tutti coloro che hanno reso possibile la realizzazione di questa tesi.