



**Politecnico  
di Torino**

**POLITECNICO DI TORINO**

**Corso di Laurea in Ingegneria Gestionale**

**Tesi di Laurea Magistrale**

**Additive Manufacturing: Stato dell'Arte, Impatti sulla  
Supply Chain e Adattamenti Strategici delle Aziende**

***Relatore:***

Arianna Alfieri

***Correlatore:***

Erica Pastore

**Candidato:**

Federico Ferrara

# Indice

<b>CAPITOLO 1 - INTRODUZIONE .....</b>	<b>3</b>
1.1 OBIETTIVI.....	4
1.2 PROTOCOLLO DI RICERCA .....	5
1.2.1 Criteri di inclusione ed esclusione degli studi .....	6
1.2.2 Database e Fonti di Informazione.....	7
1.2.3 Analisi e risultati della ricerca.....	8
<b>CAPITOLO 2 - ADDITIVE MANUFACTURING .....</b>	<b>9</b>
2.1 DEFINIZIONE DI ADDITIVE MANUFACTURING .....	9
2.2 IL PROCESSO DI PRODUZIONE .....	10
2.3 CATEGORIZZAZIONE DI PROCESSO .....	11
2.3.1 Binder Jetting (BJ) .....	12
2.3.2 Directed Energy Deposition (DED).....	13
2.3.3 Material Extrusion (ME).....	14
2.3.4 Material Jetting (MJ) .....	15
2.3.5 Powder Bed Fusion (PBF) .....	16
2.3.6 Sheet Lamination (SL).....	17
2.3.7 Vat Photopolymerization (VP) .....	18
2.4 I VANTAGGI DELL'ADDITIVE MANUFACTURING .....	18
2.5 I LIMITI IMPOSTI DALLA NUOVA TECNOLOGIA.....	20
2.6 SETTORI DI APPLICAZIONE DELL'ADDITIVE MANUFACTURING.....	21
2.6.1 Applicazione in ambito Aerospaziale.....	21
2.6.2 Applicazione in ambito Automobilistico .....	22
<b>CAPITOLO 3 - SUPPLY CHAIN.....</b>	<b>24</b>
3.1 DEFINIZIONE DI LOGISTICA E SUPPLY CHAIN.....	24
3.2 LE FASI DELLA SUPPLY CHAIN.....	25
3.3 SUPPLY CHAIN MANAGEMENT: COMPETIZIONE AZIENDALE .....	26
3.4 ADATTARSI PER SOPRAVVIVERE: I CAMBIAMENTI DELLA SUPPLY CHAIN .....	27
3.4.1 LEAN SUPPLY CHAIN .....	28
3.4.2 AGILE SUPPLY CHAIN .....	29
<b>CAPITOLO 4 - ADDITIVE MANUFACTURING E SUPPLY CHAIN.....</b>	<b>31</b>
4.1 L'EVOLUZIONE DELLA SUPPLY CHAIN: INTEGRAZIONE AM.....	31
4.1.1 Personalizzazione di massa.....	32
4.1.2 Lean Supply Chain 2.0 .....	33
4.1.3 Agile Supply Chain 2.0.....	34

4.2 NUOVE STRUTTURE: SUPPLY CHAIN E AM.....	34
4.2.1 SC-AM con struttura centralizzata.....	35
4.2.2 SC-AM con struttura decentralizzata.....	36
4.2.3 SC-AM con struttura intermedia o ad hub.....	37
4.2.4 SC-AM con struttura domestica.....	38
4.3 CAMBIAMENTI ORGANIZZATIVI.....	39
4.3.1 Ristrutturazione delle relazioni con i fornitori.....	39
4.3.2 Riformulazione del flusso produttivo.....	39
4.4 ADDITIVE MANUFACTURING ED ECONOMIE DI SCALA.....	41
4.4.1 Vantaggi nei costi.....	43
4.5 PUNTI DI APPLICAZIONE DELL'ADDITIVE MANUFACTURING.....	44
4.5.1 Applicazione dell'AM in attività di R&D.....	45
4.5.2 Applicazione dell'AM in attività di Rapid Prototyping.....	46
<b>CAPITOLO 5 – IL RESHORING E LA SUA CONNESSIONE CON L'AM.....</b>	<b>48</b>
5.1 OFFSHORING VS RESHORING.....	48
5.2 OFFSHORING.....	49
5.2.1 I vantaggi.....	50
5.2.2 Rischi e criticità.....	50
5.3 RESHORING.....	51
5.3.1 Reshoring in Italia e differenze con gli altri paesi.....	52
5.4 RESHORING E ADDITIVE MANUFACTURING.....	53
5.4.1 CORRELAZIONE TRA RESHORING E AM.....	56
<b>CAPITOLO 6 - CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI.....</b>	<b>58</b>
<b>ELENCO DELLE FIGURE E TABELLE.....</b>	<b>60</b>
<b>BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA.....</b>	<b>61</b>

## Capitolo 1 - Introduzione

La ricerca di maggiore resilienza, sostenibilità e flessibilità nelle catene di approvvigionamento ha dato origine alla Quarta Rivoluzione Industriale e all'Industria 4.0. Questa fase di evoluzione rappresenta la Digital Supply Chain, un nuovo paradigma nella progettazione, esecuzione e gestione delle catene di approvvigionamento, con un impatto trasformativo sia sulla produzione che sulla distribuzione [1]. La Digital Supply Chain rappresenta un nuovo sistema rapido, flessibile, reattivo ed efficiente, in grado di risparmiare tempo e soddisfare le esigenze dei clienti in modo più efficace [2].

L'Industria 4.0 è progettata per consentire la produzione industriale completamente automatizzata e interconnessa attraverso l'adozione di un insieme di tecnologie, denominate "tecnologie abilitanti", pensate e ideate per rinnovare i sistemi di produzione e i processi industriali, oltre a creare una catena di approvvigionamento digitalizzata e intelligente [3].

Tra queste tecnologie abilitanti, il presente studio si concentrerà, attraverso lo studio della letteratura, sull'Additive Manufacturing, nota anche come fabbricazione additiva o stampa 3D, e in particolare sulla sua applicazione nella catena di approvvigionamento.

La stampa 3D è considerata la rivoluzione industriale di questo secolo secondo esperti e fonti specializzate a livello globale. Questa tecnologia ha aperto le porte all'era della "fabbrica personale", in cui la creazione di oggetti personalizzati è diventata accessibile a chiunque direttamente dal proprio ambiente domestico. L'evoluzione della stampa 3D, negli ultimi anni, ha esteso il suo impatto a numerosi settori industriali, spaziando dalla gioielleria all'arte, dall'automotive alla medicina e molti altri [4].

Tuttavia, l'influenza innovativa di questa tecnologia va ben oltre la semplice possibilità di realizzare oggetti personali. La produzione industriale e le catene di approvvigionamento di un numero crescente di aziende stanno attraversando una profonda trasformazione grazie all'implementazione di questa tecnologia avanzata [5].

Un'indagine condotta da HP nel 2020 [2] ha messo in luce il ruolo cruciale dell'Additive Manufacturing nella promozione della trasformazione digitale. Secondo quanto riportato, infatti, il 96% dei principali produttori di componenti industriali in Europa riconosce l'importanza della produzione additiva, in quanto contribuisce a ridurre il time-to-market per i nuovi prodotti e ad accelerare la digitalizzazione dei processi di produzione. Inoltre, come sostenuto da Oettmeier e Hofmann [7], oltre il 57% degli intervistati ha anche

indicato che l'Additive Manufacturing potrebbe offrire il supporto necessario per abbreviare le catene di approvvigionamento e per raggiungere gli obiettivi di sostenibilità, reattività e flessibilità necessari per adattarsi alle fluttuazioni della domanda [2].

Per tutte queste ragioni, si è ritenuto fondamentale concentrare un'analisi bibliografica su questa tecnologia, esplorando la sua evoluzione, le tendenze emergenti e le lacune nella ricerca in relazione alla catena di approvvigionamento e alla sua digitalizzazione.

## 1.1 Obiettivi

L'integrazione dell'Additive Manufacturing all'interno della Supply Chain rappresenta un ambito di rilevanza scientifica a causa delle profonde trasformazioni che questa tecnologia innovativa sta apportando alla gestione e all'organizzazione della catena di approvvigionamento.

La presente tesi si concentra inizialmente sull'evoluzione e sullo stato dell'arte dell'Additive Manufacturing, identificando le diverse categorie di processi e analizzando gli impatti, i vantaggi e le sfide connessi a questa tecnologia avanzata. Vengono esaminati i settori in cui la fabbricazione additiva ha introdotto cambiamenti significativi, concentrandosi sul settore aerospaziale e automobilistico.

Inoltre, lo studio esamina in dettaglio la Supply Chain e la gestione della catena di approvvigionamento, analizzando le sue componenti principali e le pratiche di gestione più diffuse. Esplora, inoltre, il Supply Chain Management come fattore che influenza la competitività aziendale. Attraverso l'analisi delle filosofie di Lean e Agile Supply Chain, si sottolinea l'importanza dell'adattamento e delle modifiche nella gestione della catena di approvvigionamento.

Successivamente, l'obiettivo della ricerca è stabilire un collegamento significativo tra l'Additive Manufacturing e la Supply Chain, rivelando l'influenza e l'impatto che questa nuova tecnologia esercita nel sistema di gestione della catena di approvvigionamento. Si mira a comprendere come l'adozione dell'Additive Manufacturing trasforma i processi, la logistica e la gestione globale della Supply Chain, contribuendo a fornire una visione più completa e informativa dell'interazione tra le due componenti.

Infine, la tesi esamina in dettaglio i fenomeni dell'offshoring e del reshoring, analizzando i vantaggi e le sfide legati a entrambi i concetti. In particolare, si focalizza sul reshoring

in Italia e sulle sue peculiarità rispetto ad altri paesi, esplorando la correlazione tra questo fenomeno e l'impiego dell'Additive Manufacturing.

Questa tesi si propone di esplorare l'impatto dell'Additive Manufacturing su diversi aspetti chiave dell'industria. Le seguenti tre domande di ricerca guideranno l'indagine su questa tecnologia avanzata e sulle sue implicazioni:

- 1) *Come si è evoluto lo stato dell'arte dell'Additive Manufacturing e quali sono le principali innovazioni e tendenze in questa tecnologia avanzata?*
- 2) *Quali impatti la diffusione dell'Additive Manufacturing ha sulla gestione della supply chain e come le aziende stanno adattando le loro strategie logistiche per sfruttare al meglio questa tecnologia?*
- 3) *In che misura l'adozione dell'Additive Manufacturing sta influenzando il fenomeno di reshoring nell'industria manifatturiera e quali sono le implicazioni per la localizzazione delle attività produttive?*

L'obiettivo di questa ricerca è rispondere a tali domande attraverso l'individuazione e l'analisi della letteratura presente. I passi successivi coinvolgono la creazione di un protocollo di ricerca mirato a ottenere una campionatura appropriata di fonti.

## 1.2 Protocollo di ricerca

Il seguente elaborato è stato sviluppato adottando una metodologia di ricerca nota come "Systematic Literature Review" (SLR). Questo approccio metodologico è stato scelto per garantire validità e robustezza alla ricerca, oltre a fornire una panoramica esaustiva degli studi precedentemente condotti nel campo di indagine.

Per condurre la SLR, è stato sviluppato un protocollo di ricerca che ha definito:

- criteri di inclusione ed esclusione degli studi;
- i database e le fonti da cui estrarre le informazioni;
- le procedure per la valutazione critica degli articoli selezionati.

Una volta completata la fase di selezione e valutazione, si è passato alla sintesi sistematica dei dati, identificando tendenze, modelli o conclusioni comuni tra gli studi inclusi. I

risultati della SLR hanno fornito una base solida per la stesura dell'elaborato, consentendo di contestualizzare il contributo dello studio all'interno del panorama attuale della letteratura sull'argomento.

### 1.2.1 Criteri di inclusione ed esclusione degli studi

Nel corso della Systematic Literature Review (SLR) sono stati definiti dei criteri di inclusione ed esclusione degli studi al fine di selezionare in modo accurato e coerente gli articoli da includere nell'analisi.

In particolare, sono stati considerati solo gli studi pubblicati in italiano ed inglese, che trattano specificamente lo stato dell'arte e l'evoluzione della tecnologia additiva, i componenti principali e gli approcci di gestione della supply chain, l'applicazione dell'additive manufacturing nel contesto della supply chain e l'influenza della tecnologia additiva per le decisioni di reshoring.

Quindi, sono state elaborate delle serie di termini di ricerca comprendenti le parole chiave da impiegare nella ricerca delle pubblicazioni relative a ciascun argomento identificato (tabella 1).

*Tabella 1. Parole chiave per la ricerca delle fonti*

<b>Argomento</b>	<b>Parole chiave</b>
<b>Additive Manufacturing</b>	"additive manufacturing", "3D printing", "strengths and weaknesses", "innovations", "industry adoptions", "rapid prototyping"
<b>Supply Chain</b>	"supply chain", "logistica", "supply chain management", "lean supply chain", "agile supply chain", "structures", "mass personalization"
<b>Reshoring</b>	"offshoring", "reshoring", "Italy", "reasons", "advantages and disadvantages"

Inoltre, seppur non limitando la ricerca agli articoli pubblicati in un determinato periodo storico, è stata prestata una maggiore attenzione sugli studi divulgati dal 2010 in poi, per garantire che le informazioni riportate fossero basate su informazioni recenti e pertinenti. Gli studi che non si conformavano ai nostri criteri di inclusione sono infatti stati esclusi dalla nostra analisi. Questo approccio rigoroso nella definizione dei criteri di inclusione ed esclusione ha consentito di condurre una SLR accurata e focalizzata sulla nostra area di interesse, garantendo la validità e la coerenza dei risultati presentati nella tesi.

## 1.2.2 Database e Fonti di Informazione

La ricerca si è basata su diversi database accademici, oltre a siti web rilevanti per il campo di studio. Questo approccio multi-fonte ha permesso di ottenere una panoramica completa e diversificata della letteratura scientifica e tecnica disponibile.

Tra i principali database utilizzati, spiccano Scopus e Google Scholar. Il primo offre un vasto accesso a riviste scientifiche, conferenze e atti di convegni in vari campi disciplinari e si è dimostrato fondamentale per identificare articoli di ricerca peer-reviewed, revisioni sistematiche e contributi scientifici di alta qualità.

Google Scholar, invece, è stato un valido complemento ai database accademici tradizionali, offrendo l'opportunità di individuare ricerche, tesi e risorse non sempre reperibili attraverso Scopus.

Oltre ai database sopra citati, sono stati presi in considerazione anche siti web pertinenti, come quelli di organizzazioni industriali, associazioni professionali e istituzioni accademiche specializzate in Additive Manufacturing e Supply Chain. In particolare, "3Dnatives" è stato identificato come un portale web specializzato nell'ambito della divulgazione di conoscenze riguardanti la stampa 3D e la fabbricazione additiva. Il loro principale scopo consiste nella diffusione di notizie, recensioni, guide e risorse informative sulle tecnologie di stampa 3D, sulle applicazioni pratiche, sui casi di studio e sulle attuali tendenze che caratterizzano il settore.

L'utilizzo congiunto di questi diversi canali di ricerca ha permesso di accedere a una vasta gamma di fonti e di garantire una copertura esaustiva delle tematiche trattate.

### 1.2.3 Analisi e risultati della ricerca

Completata la fase di selezione degli articoli, il totale delle fonti analizzate è pari a 113. Per la gestione delle fonti selezionate e per un'organizzazione efficiente delle informazioni e dei dati pertinenti relativi a ciascuna di esse, è stato realizzato un file Excel dedicato in cui sono state registrate alcune informazioni chiave, tra cui gli autori, l'anno di pubblicazione, l'obiettivo della ricerca, il metodo di ricerca utilizzato e i principali risultati emersi dallo studio. Questo approccio ha facilitato notevolmente la successiva fase di sintesi e analisi dei dati, consentendo di avere una panoramica chiara e strutturata degli articoli selezionati e dei loro contenuti.

## Capitolo 2 - Additive Manufacturing

Il seguente capitolo permette di rispondere alla domanda di ricerca *“Come si è evoluto lo stato dell'arte dell'Additive Manufacturing e quali sono le principali innovazioni e tendenze in questa tecnologia avanzata?”*

A tale scopo, il capitolo inizia con l'analisi delle basi dell'Additive Manufacturing (AM), presentando una definizione di questa tecnologia e un dettagliato esame del suo processo di produzione, come evidenziato nei paragrafi 2.1 e 2.2. Successivamente, nel paragrafo 2.3, si procede all'esplorazione delle diverse categorie di processi AM, tra cui Binder Jetting, Directed Energy Deposition, Material Extrusion, Material Jetting, Powder Bed Fusion, Sheet Lamination e Vat Photopolymerization, con un'attenzione particolare alle loro caratteristiche distintive. Nei paragrafi 2.4 e 2.5, si approfondiscono i vantaggi rivoluzionari offerti dall'AM e i limiti che questa nuova tecnologia pone. Infine, nel paragrafo 2.6, ci si focalizza sui settori di applicazione dell'AM, con uno specifico interesse nell'ambito aerospaziale e automobilistico.

### 2.1 Definizione di Additive Manufacturing

L'Additive Manufacturing (AM), spesso chiamata anche con il nome di Fabbricazione Additiva (FA), comprende una vasta gamma di processi di produzione che si basano sulla stratificazione di materiale su livelli paralleli e perpendicolari a un asse Z [8].

Oggi, la definizione ufficiale di Additive Manufacturing è fornita dall'American Society for Testing and Materials (ASTM), che la descrive come "il processo di unione dei materiali per la creazione di oggetti a partire da dati di modelli 3D, di solito uno strato su uno strato, in contrasto con i metodi di produzione sottrattiva" [9].

Tuttavia, la definizione originale di questo processo è stata coniata da Chuck Hull, l'inventore del sistema, nel 1986. Egli la descrisse come metodo per generare oggetti tridimensionali coinvolgendo la costruzione strato dopo strato di sezioni trasversali dell'oggetto. Questi strati si creano sulla superficie di un materiale fluido che può modificare la sua condizione fisica in risposta a stimoli combinati, come esposizione a radiazioni, l'impatto di particelle o reazioni chimiche. Questi strati si combinano automaticamente mentre vengono creati, gradualmente dando forma all'oggetto tridimensionale voluto. [10].

L'adozione di questa tecnologia è motivata dai suoi vantaggi rispetto ai processi tradizionali. La sua natura additiva offre nuove possibilità di progettazione, mentre la sua natura digitale consente la produzione diretta a partire da modelli 3D. Inoltre, non richiedendo utensili specifici, permette una produzione più flessibile e veloce [5].

Questa combinazione di caratteristiche porta a vantaggi economici significativi nella produzione di oggetti personalizzati, rispetto alle tecniche tradizionali che sono ancora ampiamente utilizzate nella produzione di massa [11].

## 2.2 Il processo di produzione

L'Additive Manufacturing (AM) è un processo di produzione innovativo che si differenzia in modo significativo dai metodi tradizionali di produzione, noti come processi di lavorazione sottrattiva. Il termine "additiva" sottolinea il principio fondamentale di questa tecnologia, ossia l'aggiunta graduale di materiale per costruire il prodotto finale.

Come illustrato dalla Figura 1, il processo inizia con la creazione di un modello digitale tridimensionale dell'oggetto desiderato. Questo modello può essere progettato utilizzando software di progettazione assistita da computer (CAD) o ottenuto da una scansione 3D di un oggetto esistente [12].

Il modello digitale viene quindi suddiviso in sottili strati orizzontali (detti "slices") utilizzando un software di slicing dedicato. La stampante 3D prende questi singoli slice e inizia a costruire l'oggetto strato dopo strato. Ciò viene fatto utilizzando differenti tecnologie, come la deposizione di materiale fuso (FDM), la fotopolimerizzazione (SLA/DLP), la sinterizzazione laser selettiva (SLS), e altre. Il materiale di base, come plastica, resina, metallo o polvere ceramica, viene fuso o solidificato in ciascuno strato per creare l'oggetto desiderato [13].

L'intero processo di stampa è controllato da un computer, che segue le istruzioni del file digitale. Questa digitalizzazione del processo permette una produzione altamente personalizzata e dettagliata [5].

Dopo la deposizione del materiale, in molti casi è necessario un processo di raffreddamento o solidificazione per stabilizzare l'oggetto.

A volte, l'oggetto stampato richiede lavorazioni post-stampa come la rimozione dei supporti di stampa o la levigatura per raggiungere le specifiche di finitura desiderate [14].

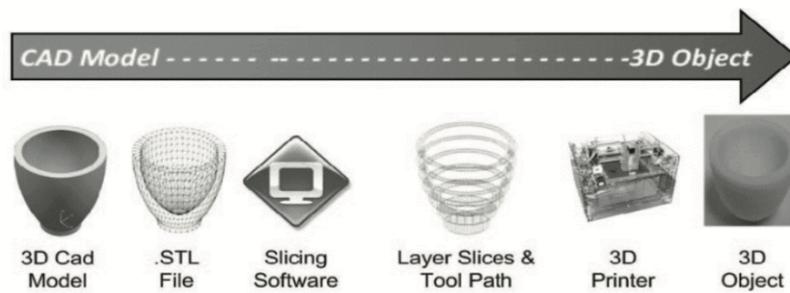


Figura 1. Processo di fabbricazione additiva [103]

## 2.3 Categorizzazione di processo

La categorizzazione dei processi di fabbricazione additiva è stata oggetto di dibattito fin dall'inizio. In letteratura, sono state presentate varie categorizzazioni che si basano sulla tipologia di materiale impiegato (polimeri, metalli o ceramiche), sulla natura del processo (diretto o indiretto) e sullo stato iniziale del materiale (liquido, solido, in polvere o fuso). Nel 2021, l'American Society for Testing and Materials (ASTM) ha stabilito una classificazione standard che suddivide tali processi in sette categorie standard [13]:

1. *Binder Jetting (BJ)*
2. *Directed Energy Deposition (DED)*
3. *Material Extrusion (ME)*;
4. *Material Jetting (MJ)*;
5. *Powder Bed Fusion (PBF)*;
6. *Sheet Lamination (SL)*;
7. *Vat Photopolymerization (VP)*

Come rappresentato nella Figura 2, questa classificazione si basa sulla fase fisica in cui si trova la materia prima impiegata, e successivamente suddivide ulteriormente in base al processo di fusione del materiale.

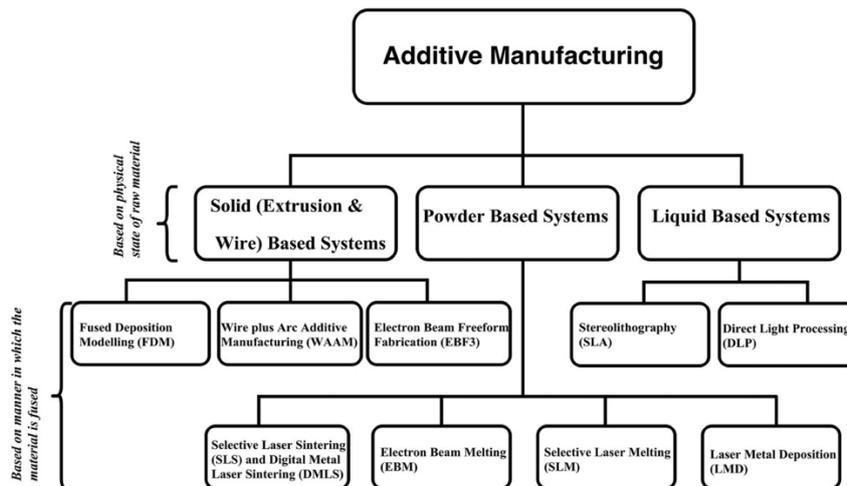


Figura 2. Categorizzazione di processo [15]

### 2.3.1 Binder Jetting (BJ)

La tecnologia del Binder Jetting (BJ) opera attraverso l'applicazione di un liquido legante su uno strato di polvere, il quale, durante il processo di solidificazione, forma una sezione trasversale [16]. Come illustrato dalla Figura 3, la procedura inizia con la distribuzione del primo strato di polvere sulla piattaforma di stampa (“Build platform”) mediante un rullo (“Leveling roller”). Successivamente, il liquido legante viene depositato selettivamente utilizzando una testina di stampa (“Inject print head”) in modalità "drop-on-demand". Dopo la realizzazione di ogni strato, la superficie di stampa si sposta verso il basso, successivamente viene distribuito uno strato aggiuntivo di materiale in polvere e il legante viene nuovamente applicato. Questa sequenza di operazioni si ripete fino a quando l'oggetto è completamente formato. [17].

Questa tecnologia, originariamente sviluppata presso il MIT negli anni '90 e successivamente introdotta sul mercato a partire dal 2010, offre diversi vantaggi significativi, tra cui tempi di produzione rapidi e l'assenza della necessità di supporti aggiuntivi [18].

Tuttavia, poiché impiega un materiale legante, il Binder Jetting non è adatto per la fabbricazione di componenti strutturali ed è principalmente utilizzato per scopi di prototipazione e la creazione di stampi [17].

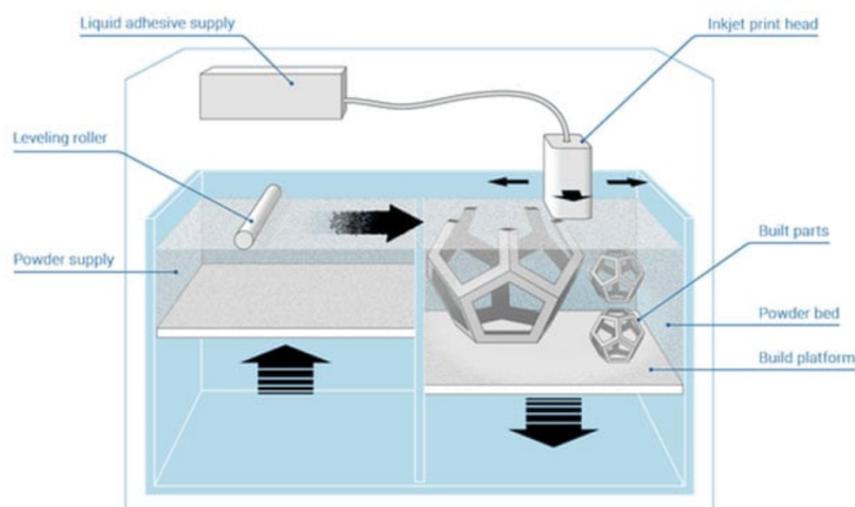


Figura 3. Binder Jetting (BJ) [17]

### 2.3.2 Directed Energy Deposition (DED)

Il Directed Energy Deposition (DED) impiega polvere metallica o filo come materia prima per formare un oggetto all'interno di una camera sottovuoto o soggetta a gas inerte. Tale accortezza risulta necessaria al fine di evitare il processo di ossidazione a cui sono sottoposte le leghe metalliche [19].

Il processo di DED consiste, come visibile in figura 4, nel depositare il materiale, fuso mediante una fonte di calore focalizzata (laser, fascio di elettroni o arco di plasma), direttamente nella zona interessata. La deposizione del materiale può avvenire tramite ugelli singoli o multipli, i quali consentono di creare direttamente le leghe durante la fabbricazione [20].

In Figura 4, ad esempio, la deposizione avviene tramite un ugello singolo e la fonte di calore utilizzata è il fascio di elettroni.

Inoltre, collegando la fonte di calore a bracci ad assi multipli, il metallo può essere stampato su superfici curve, come ad esempio strutture metalliche già esistenti. Questo vantaggio, insieme alla capacità di depositare materiali su superfici sottili con elevata precisione, ha reso possibile l'utilizzo di questa tecnologia per la riparazione di parti danneggiate, l'applicazione di rivestimenti resistenti all'usura e la protezione di parti da fenomeni di corrosione [21].

Tuttavia, le limitazioni sulle forme geometriche realizzabili (ad esempio, può essere difficile ottenere elementi sporgenti), congiuntamente alla necessità di utilizzare processi

di asportazione di materiale per ottenere una finitura superficiale adatta, hanno limitato l'utilizzo di questa tecnologia [19].

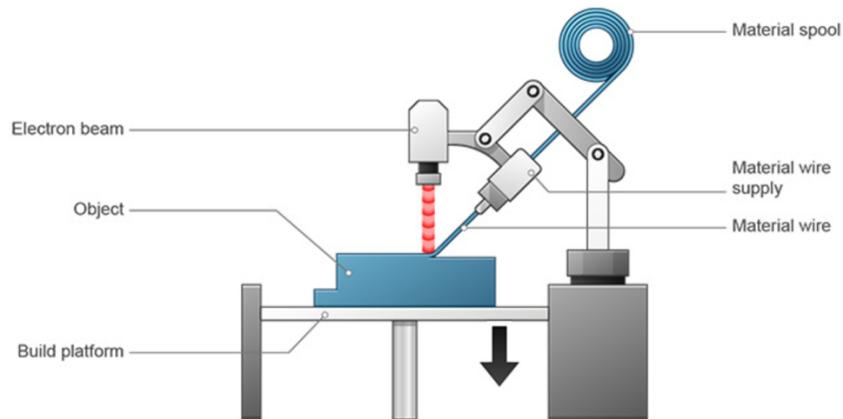


Figura 4. Direct Energy Deposition (DED) [20]

### 2.3.3 Material Extrusion (ME)

Il processo di Material Extrusion (ME), noto anche come Fused Deposition Modelling (FDM), consiste nella creazione dell'oggetto finale mediante l'estrusione riscaldata di materiale, depositato selettivamente strato dopo strato [23]. Nel corso del processo di stampa, sono impiegati due materiali termoplastici che sono parzialmente fusi: uno di essi è destinato a formare il componente stesso, mentre l'altro viene utilizzato per generare strutture di supporto necessarie. Questi due tipi di materiale vengono estrusi da ugelli separati, i quali, muovendosi lungo il piano XY, rilasciano il materiale per creare il primo strato. In seguito, la piattaforma di lavoro si abbassa lungo l'asse Z per consentire la creazione del successivo strato. Questo ciclo di operazioni si ripete fino a quando il componente è stato completamente realizzato. Durante la fase di costruzione, è essenziale controllare attentamente i parametri di processo, soprattutto la temperatura di estrusione, per garantire un'adesione perfetta tra gli strati [22]. Nella Figura 5 viene presentata una sintesi del set-up richiesto per condurre tale processo.

Il processo FDM, inventato e brevettato da Stratasys nel 1989, introduce una delle prime tecniche di fabbricazione additiva basate su materiale termoplastico definitivo [24]. Questa tecnologia ha trovato molteplici applicazioni grazie alla sua versatilità, tra cui la prototipazione rapida ed economica e la produzione di parti resistenti e adatte all'uso finale. Inoltre, altri vantaggi includono l'assenza di lavorazioni post-stampa e la sicurezza

dell'operatore, poiché la lavorazione avviene all'interno della macchina senza contatti diretti con il materiale fuso [23].

Tuttavia, questa tecnologia presenta alcune limitazioni, tra cui i lunghi tempi di costruzione dovuti all'uso di soli due ugelli e la difficoltà di sfruttare completamente il volume di lavoro, poiché non è possibile sovrapporre pezzi a causa della complessità nella rimozione dei supporti [24].

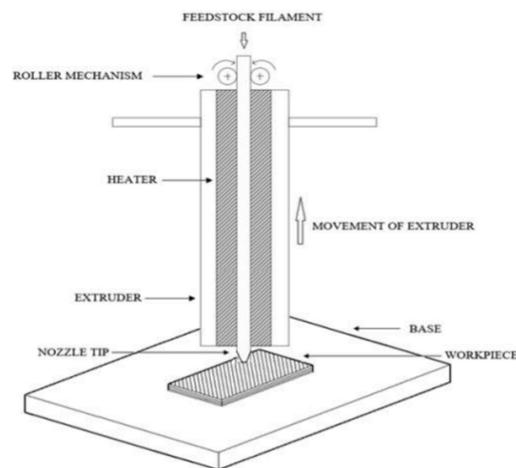


Figura 5. Material Extrusion (ME) [23]

### 2.3.4 Material Jetting (MJ)

Il processo di Material Jetting (MJ) consiste nella deposizione di materiale fotopolimerico liquido tramite testine di stampa. La deposizione del materiale può essere a getto continuo o attraverso la modalità drop-on-demand [25].

La Figura 6 mostra una sintesi del set-up richiesto per condurre il processo di Material Jetting. La testina (“Inkjet Print Heads”) si sposta attorno all’area di stampa (“Build Platform”) depositando selettivamente goccioline di materiale di costruzione, mentre le lampade UV che circondano la testina (“UV Curing Light”) passano sopra il materiale e lo polimerizzano, solidificandolo in posizione [27]. Attualmente, i materiali utilizzati in questa tecnologia includono fotopolimeri liquidi e cere [26].

Sebbene questa tecnologia consenta di produrre oggetti multicolori e multimateriale e il processo offra prestazioni soddisfacenti in termini di tolleranze dimensionali e rugosità superficiale, vi sono alcune limitazioni significative che ne impediscono la diffusione.

Le parti prodotte possono presentare scarse proprietà meccaniche, il che rende questa tecnologia meno adatta per la produzione di componenti finali ma ideale per la creazione di prototipi funzionali [27].

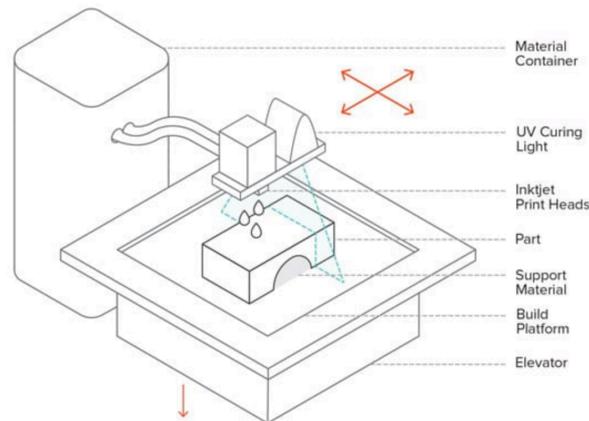


Figura 6. Material Jetting (MJ) [26]

### 2.3.5 Powder Bed Fusion (PBF)

La tecnologia di Powder Bed Fusion (PBF) è un metodo di produzione additiva che si basa sulla fusione di sottili strati di materiale in polvere per creare oggetti tridimensionali. Questa tecnologia può utilizzare diversi approcci, tra cui Selective Laser Sintering (SLS) e Selective Laser Melting (SLM), che utilizzano un laser o una fonte di energia simile per fondere selettivamente il materiale in polvere in strati successivi conformi al modello 3D desiderato [28].

Nella Figura 7 è mostrata una panoramica del set-up necessario per condurre il processo di Powder Bed Fusion.

Successivamente al completamento del processo di stampaggio, la polvere che non è stata processata o fusa viene recuperata e può essere riutilizzata. Questa è una delle caratteristiche vantaggiose della tecnologia PBF, in quanto aiuta a ridurre gli sprechi di materiale e a contenere i costi di produzione [29].

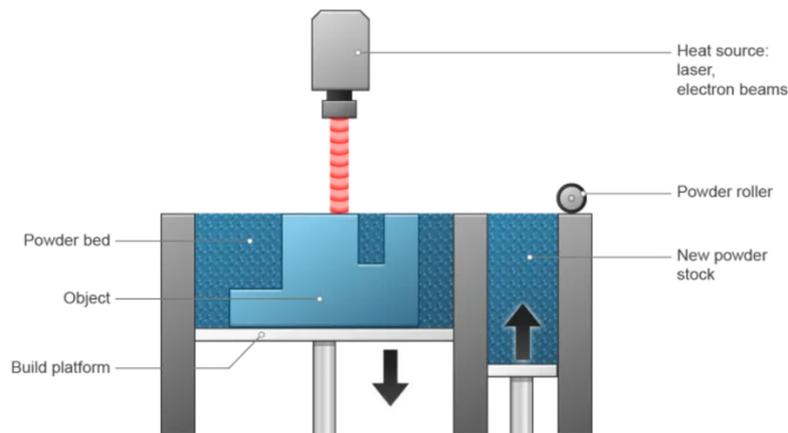


Figura 7. Powder Bed Fusion (PB) [113]

### 2.3.6 Sheet Lamination (SL)

La Sheet Lamination (SL) è una tecnica di produzione additiva in cui fogli di materiale vengono uniti insieme per creare l'oggetto finale. Come visibile in Figura 8, il processo di stampa consiste nel creare un contorno dell'oggetto nella sezione trasversale del materiale e, utilizzando un processo di taglio o fresatura, rimuovere tutto l'eccesso. Questo processo è ripetuto per ciascuno strato fino a quando l'intero oggetto non è stato creato [31].

Sebbene i vantaggi legati alla Sheet Lamination varino molto a seconda del tipo di materiale utilizzato e della tecnica di laminazione impiegata per unire i fogli, la limitazione comune a tutte le tipologie utilizzate è che la qualità del prodotto finale dipende strettamente dallo spessore di ogni foglio impiegato [30].

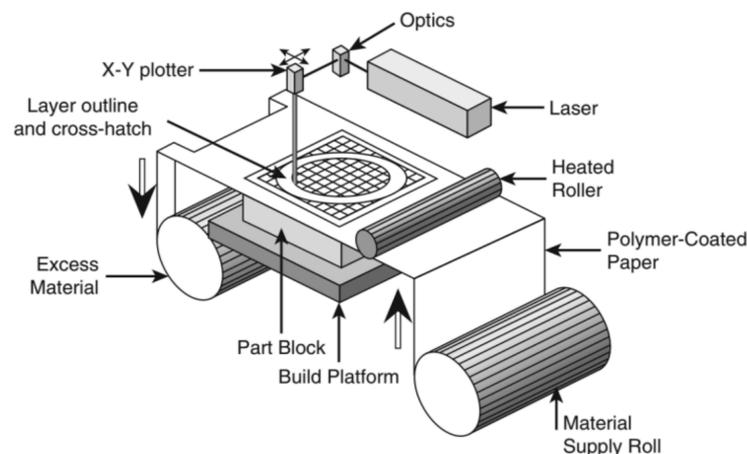


Figura 8. Sheet Lamination (SL) [31]

### 2.3.7 Vat Photopolymerization (VP)

Il processo di Vat Photopolymerization (VP) si basa sulla solidificazione selettiva di polimeri liquidi attraverso l'irraggiamento con radiazioni elettromagnetiche, spesso fornite da un laser o una fonte simile. Un esempio noto di questa categoria è la Stereolitografia (SLA). Nel processo SLA, un laser viene utilizzato per disegnare ciascuno strato di un modello in una resina fotopolimerica, che è una plastica reattiva alla luce. Il laser polimerizza uno strato alla volta utilizzando raggi UV, solidificando la resina e costruendo così il modello strato dopo strato [32]. Nella Figura 9 è mostrata una panoramica del set-up necessario per condurre il processo di Vat Photopolymerization. La VP consente di ottenere finiture superficiali con dettagli molto elevati ed è attualmente il processo più preciso disponibile sul mercato, garantendo la migliore qualità superficiale tra le tecnologie additive. Tuttavia, i fotopolimeri utilizzati in questo processo sono materiali termoidurenti, il che significa che non sono riciclabili. Di conseguenza, questa tecnologia non è adatta per la produzione di beni di largo consumo ma è più indicata per la realizzazione di prototipi funzionali ed estetici [33, 34].

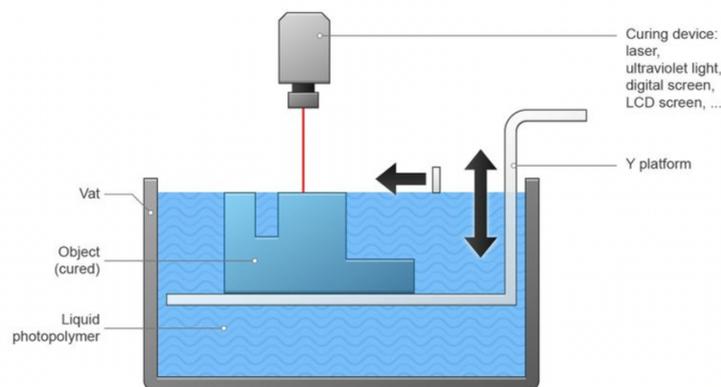


Figura 9. Vat Photopolymerization (VP) [113]

## 2.4 I vantaggi dell'Additive Manufacturing

I vantaggi dell'Additive Manufacturing sono evidenti e trasformano significativamente i processi di produzione così come li conosciamo oggi [7]. Uno dei principali benefici è la possibilità di realizzare parti integrate senza la necessità di molteplici lavorazioni o l'uso di diverse macchine. In sostanza, è possibile creare un assemblaggio di parti realizzate con lo stesso materiale come se fosse un unico pezzo, eliminando così problemi di costi, tempi e qualità legati all'assemblaggio [36, 12].

Inoltre, l'Additive Manufacturing offre una libertà di progettazione senza precedenti, consentendo ai progettisti di concentrarsi esclusivamente sul miglioramento del design senza doversi preoccupare dei limiti delle macchine tradizionali. Questo significa che è possibile realizzare forme contorte, reticoli e fori ciechi, permettendo una maggiore personalizzazione e modifiche istantanee degli oggetti per soddisfare le esigenze dei clienti [12].

Dal punto di vista economico, la complessità geometrica non comporta un aumento dei costi, poiché il prodotto viene creato strato per strato, mantenendo costi e tempi simili a quelli delle parti semplici [7]. Inoltre, la stampa 3D è un processo sostenibile dal punto di vista ambientale, utilizzando solo il materiale necessario e riciclando tutto quello non utilizzato [5].

A livello di produzione, l'Additive Manufacturing riduce notevolmente il divario temporale tra lo sviluppo del design e la realizzazione del prototipo o del prodotto finale, eliminando la necessità di attrezzature costose e riducendo i tempi di assemblaggio. Questo concetto di "Economie of One" sconvolge il tradizionale concetto di economie di scala, consentendo alle aziende di entrare rapidamente in nuovi mercati o industrie con costi di ingresso relativamente bassi [4].

A livello aziendale, la stampa 3D supporta la riduzione dei costi di produzione, dei costi logistici e degli stock, migliorando la redditività [12]. Inoltre, questa tecnologia accelera l'innovazione dei prodotti, consentendo alle aziende di testare rapidamente nuove idee a costi contenuti. Questo cambia anche i modelli di business, passando da un'ottica basata sui costi a una basata sul valore [37].

Infine, a livello di mercato, la riduzione dei tempi di sviluppo e l'introduzione rapida dei prodotti sul mercato aumentano la proposta di valore. La stampa 3D consente la personalizzazione di massa a costi relativamente bassi, eliminando la necessità di cambiare attrezzature di produzione [4]. Questa tecnologia apre la strada a una vasta varietà di prodotti, catturando l'interesse dei consumatori e consentendo alle aziende di applicare sovrapprezzi per aumentare i profitti [5].

## 2.5 I limiti imposti dalla nuova tecnologia

Nonostante i notevoli vantaggi della stampa 3D, questa tecnologia presenta anche alcuni significativi svantaggi che ne limitano l'implementazione completa. Come evidenziato nei processi descritti precedentemente, tra i principali svantaggi spiccano le restrizioni sulle dimensioni degli oggetti stampabili e i tempi di produzione più lunghi rispetto ai processi tradizionali.

Infatti, le stampanti 3D hanno limiti nelle dimensioni degli oggetti che possono essere creati, e necessitano quindi di stampare parti separate per poi assemblare il prodotto completo. Infatti, dal punto di vista dei tempi di produzione, i processi di stampa 3D sono più lenti rispetto ai metodi tradizionali, rendendo la produzione convenzionale la scelta preferita in caso di volumi elevati [12].

Inoltre, i costi delle attrezzature di stampa e dei materiali rappresentano ad oggi un limite significativo, sebbene ci sia la prospettiva di riduzione dei prezzi con lo sviluppo continuo della tecnologia e l'entrata di nuovi produttori [11].

A livello di prodotto, la necessità di supporti durante il processo di stampa può generare rugosità superficiale e imperfezioni che richiedono lavorazioni aggiuntive per ottenere la qualità ottenuta mediante le lavorazioni sottrattive [35].

A livello aziendale, l'ampia disponibilità di design online e la possibilità di stampare in proprio sollevano preoccupazioni legate ai diritti di proprietà intellettuale, mentre la decentralizzazione della produzione grazie alla stampa 3D potrebbe minare l'attuale modello di business delle aziende [38].

A livello di mercato, la diminuzione dei prezzi delle stampanti 3D ha reso possibile per i consumatori e le piccole imprese accedere a questa tecnologia, ma allo stesso tempo ha aumentato il rischio di imitazioni dei prodotti [39]. L'eliminazione dei costi di attrezzature e la possibilità di utilizzare le stesse macchine per produrre una varietà di parti stanno abbassando le barriere all'ingresso in molte industrie, consentendo l'entrata di nuovi concorrenti con maggiore agilità e minori investimenti iniziali [5, 39].

## 2.6 Settori di applicazione dell'Additive Manufacturing

Negli ultimi anni, la stampa 3D ha dimostrato di essere estremamente efficace in numerosi settori industriali, rendendola una risorsa inestimabile grazie alla sua versatilità e alla sua capacità di adattarsi alle esigenze specifiche del campo di applicazione [40]. Questa tecnologia rivoluzionaria ha dimostrato il suo valore in settori come l'aerospaziale, l'automobilistico, la medicina, l'edilizia, la moda e molti altri.

Una panoramica delle aree di applicazione più importanti della stampa 3D è riportata nella Figura 10, basata sul Wohlers Report del 2014 [41]. In particolare, l'applicazione della fabbricazione additiva riveste un'importanza notevole nei settori dei prodotti di consumo e della produzione industriale, con una percentuale sul totale rispettivamente del 18% e del 18,5%. Inoltre, anche l'industria automobilistica (17,3%), quella medica (13,7%) e l'aerospaziale (12,3%) adottano ampiamente questa tecnologia di produzione.

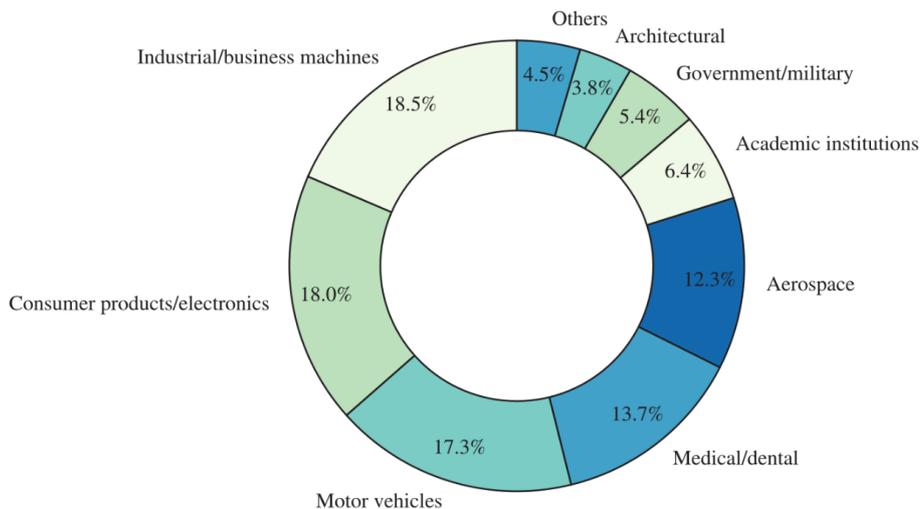


Figura 10. Settori di applicazione dell'Additive Manufacturing [41]

### 2.6.1 Applicazione in ambito Aerospaziale

La stampa 3D sta indubbiamente rivoluzionando il panorama della produzione, persino in settori altamente avanzati e sofisticati come l'industria aerospaziale, la quale si basa su due principali requisiti fondamentali: il peso ridotto e l'alta sicurezza [15].

L'Additive Manufacturing è stata in grado di contribuire alla riduzione del peso grazie a processi di produzione complessi e alla creazione di forme nette con un minor numero di giunture e geometrie intricate [12, 44]. Tuttavia, dal punto di vista della sicurezza, c'è

ancora molta strada da fare prima che la stampa 3D possa diventare uno standard affidabile. Vi sono ancora numerose sfide da affrontare e risolvere completamente, tra cui la definizione di modelli di stampa, la gestione della porosità e l'ottimizzazione del flusso di stampa [42]. Una volta superate tali sfide, la stampa 3D sostituirà sempre più le tecniche tradizionali e godrà di un'adozione e crescita costante. Attraverso la Figura 11, riportata nello studio di Gebler et al. [42], è possibile visualizzare graficamente gli effetti previsti della stampa 3D nell'industria aerospaziale entro il 2025, sottolineando la sua importanza sia in termini di potenziale di mercato, sia in termini di sostenibilità ambientale.

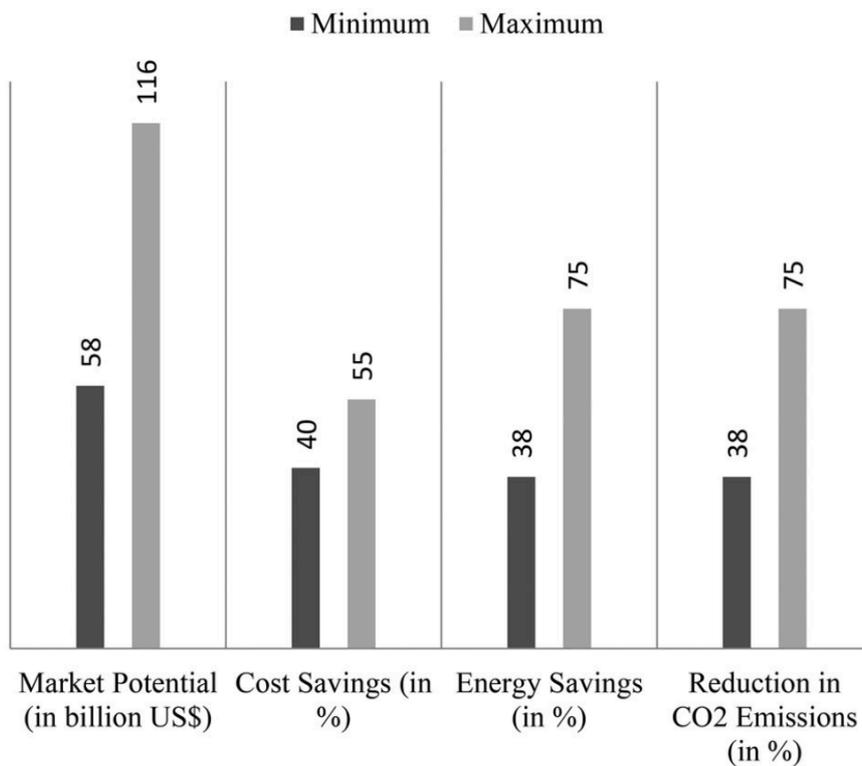


Figura 11. Effetti previsti della stampa 3D nell'industria aerospaziale entro il 2025 [43]

## 2.6.2 Applicazione in ambito Automobilistico

La tecnologia di produzione additiva rappresenta un fattore significativo nel favorire la competitività tra le case automobilistiche [44]. Rispetto ai tradizionali processi di produzione che spesso limitano le opzioni di design [12], l'Additive Manufacturing consente di realizzare componenti con una maggiore flessibilità nel processo di progettazione, offrendo notevoli vantaggi nella produzione di caratteristiche personalizzate e permettendo l'aggiunta di funzionalità avanzate [44].

Nel settore automobilistico, l'impatto della stampa 3D è in continua crescita. I dati di mercato indicano una proiezione di notevole espansione, con un aumento previsto da circa 2,13 miliardi di dollari nel 2021 a circa 2,97 miliardi di dollari nel 2022, e con prospettive ancora più ampie che potrebbero portare il valore di questo mercato a raggiungere i 9,7 miliardi di dollari entro il 2030 [45]. Questa previsione è un indicatore dell'ampia adozione della tecnologia di stampa 3D nel settore automobilistico e sta spingendo le aziende ad investire sempre di più in questa tecnologia.

Ad esempio, BMW ha inaugurato un nuovo Campus per la produzione additiva. Questa struttura, per la quale l'azienda ha stanziato un investimento di 15 milioni di euro, è destinata alla produzione di prototipi, parti in serie e ricerca tecnologica. L'obiettivo principale del gruppo è migliorare l'efficienza della produzione in serie dei componenti, consentendone l'integrazione anche nei veicoli con volumi di vendita elevati [46].

## Capitolo 3 - Supply Chain

Il terzo capitolo si propone di fornire una panoramica completa delle dinamiche e dei principi fondamentali che regolano la logistica e la gestione della catena di approvvigionamento (Supply Chain Management, SCM). Inizialmente, nel paragrafo 3.1, vengono delineate le definizioni essenziali relative alla logistica e alla Supply Chain, fornendo un quadro concettuale di base. Successivamente, mentre il paragrafo 3.2 esamina le diverse fasi che compongono la Supply Chain, illustrando come i prodotti e i servizi si spostino attraverso questa rete complessa, il paragrafo 3.3, si sofferma sull'importanza della gestione della Supply Chain come elemento cruciale per la competitività aziendale. Infine, il paragrafo 3.4 mette in luce la necessità di adattarsi ai cambiamenti che caratterizzano la Supply Chain moderna, introducendo i concetti di Lean Supply Chain e Agile Supply Chain.

Questo capitolo fornisce una panoramica approfondita delle dinamiche e delle strategie chiave per la gestione efficiente di una catena di approvvigionamento, aprendo la strada all'analisi più dettagliata che seguirà nei capitoli successivi.

### 3.1 Definizione di Logistica e Supply Chain

Sempre più spesso si tende a sovrapporre il concetto di Supply Chain con quello di Logistica, seppur i due termini si riferiscono ad argomenti differenti.

Infatti, la logistica è descritta dal *Council of Logistics Management* come un processo di pianificazione, attuazione e supervisione del movimento e dello stoccaggio di materie prime, prodotti semilavorati e finiti, insieme alle informazioni corrispondenti, dal punto di origine al punto di consumo, mirato a soddisfare le necessità dei clienti [47].

Se da un lato la logistica si concentra principalmente sullo spostamento e sull'immagazzinamento di materiali, semilavorati e prodotti finiti, la supply chain, detta anche catena di approvvigionamento, comprende tutte le attività coinvolte nella gestione di un prodotto, dall'acquisizione delle materie prime alla produzione, distribuzione e consegna al cliente finale [48]. La logistica è una parte importante della catena di approvvigionamento, ma la supply chain è un concetto più ampio che copre l'intero ciclo di vita del prodotto, dalla sua creazione alla sua distribuzione [47].

Quindi, la supply chain è definita come “un sistema connesso di organizzazioni, attività, informazioni, risorse e attori progettato per reperire, produrre e spostare le merci dall’origine alla destinazione finale, in genere da un fornitore a un cliente finale” [49].

### 3.2 Le fasi della Supply Chain

La supply chain, o catena di approvvigionamento, prende questo nome poiché è formata da una serie di collegamenti e processi interconnessi che trasformano le materie prime in prodotti finiti e li consegnano ai consumatori finali. Il termine "catena" suggerisce un'immagine di continuità e interdipendenza tra le diverse fasi coinvolte nella produzione e nella distribuzione dei beni e dei servizi. Ogni fase è collegata alle altre e un'interruzione o un problema in una di queste può avere un impatto significativo su tutte le altre.

All'interno del contesto della catena di approvvigionamento è possibile effettuare una suddivisione di quest’ultima in tre fasi fondamentali al fine di effettuare un’analisi dettagliata e ottenere una migliore comprensione del funzionamento dell’intera supply chain [49]. Come visibile in Figura 12, le tre fasi si distinguono in: approvvigionamento, produzione e distribuzione.

Risulta importante sottolineare che ciascuna fase identificata può essere ulteriormente approfondita attraverso la suddivisione in processi più specifici.

La prima fase è quella dell'*approvvigionamento*. Qui, l'azienda si concentra sulla selezione dei fornitori, la negoziazione dei contratti, l'acquisto di materie prime e la gestione delle scorte [54]. È il punto iniziale in cui la supply chain inizia a prendere forma, poiché si tratta di assicurarsi che ci siano le risorse necessarie per iniziare il processo di produzione o distribuzione.

La seconda fase è la *produzione*. Durante questa fase, le materie prime o i componenti vengono trasformati in prodotti finiti. Questo processo può variare notevolmente in base al settore e al tipo di mercato in cui si opera [55], ma è essenziale per creare il valore aggiunto che i clienti cercano nei prodotti finali.

La terza fase critica è quella della *distribuzione*. In questa fase, i prodotti finiti vengono distribuiti ai clienti o ai punti vendita. Questo può coinvolgere attività come la gestione dei magazzini, la pianificazione delle rotte di consegna, l'imballaggio e la spedizione dei prodotti, garantendo che raggiungano i clienti in modo tempestivo e soddisfacente [54].

Ognuna di queste fasi, a sua volta, è composta da una serie di processi più specifici, ciascuno dei quali svolge un ruolo cruciale nella gestione complessiva della catena di approvvigionamento [48]. La pianificazione accurata e la coordinazione di questi processi sono fondamentali per garantire un flusso efficiente delle merci e la soddisfazione delle esigenze dei clienti [49].

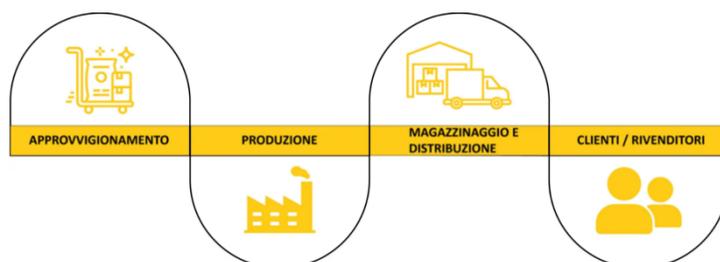


Figura 12. Macro Fasi Supply Chain [49]

Questo concetto di "catena" sottolinea l'importanza della gestione efficace di ogni collegamento all'interno della supply chain al fine di massimizzare l'efficienza, ridurre i costi e migliorare la qualità del servizio. La gestione della supply chain mira a ottimizzare questi collegamenti per garantire che i prodotti o i servizi siano disponibili quando e dove sono necessari, contribuendo così al successo dell'azienda [50].

### 3.3 Supply Chain Management: competizione aziendale

In un contesto sempre più globale e competitivo, la collaborazione e la sincronizzazione tra i vari attori della catena di approvvigionamento diventano fattori critici per garantire efficienza, resilienza e soddisfazione del cliente [50]. La catena di approvvigionamento non è più vista come una serie di processi isolati, ma, come evidenziato nella Figura 13, come un sistema interconnesso in cui il successo di uno può influenzare direttamente il successo degli altri [48].

Pertanto, i nuovi modelli di business pongono un'enfasi significativa sul concetto che siano le catene di approvvigionamento stesse a competere, piuttosto che le singole aziende che le compongono [7]. Difatti, oggi, la capacità di offrire il prodotto giusto, al prezzo giusto e al momento giusto non è solo una fonte di vantaggio competitivo, ma rappresenta un requisito fondamentale per la stessa sopravvivenza sul mercato [49]. Di

conseguenza, comprendere appieno le esigenze del cliente finale e soddisfare le sue aspettative diventano elementi chiave nello sviluppo di una strategia efficiente.

In questo contesto, si introduce il concetto di Supply Chain Management (SCM), che è inteso come la gestione dei flussi di merci e di informazioni e di tutti quei prodotti e servizi forniti al cliente finale che generano valore [51].



Figura 13. Supply Chain Management (SCM) flow [54]

### 3.4 Adattarsi per sopravvivere: i cambiamenti della Supply Chain

A causa della rapida evoluzione delle dinamiche di mercato e delle sempre più elevate aspettative dei clienti, le organizzazioni si trovano costantemente nella necessità di adattare le loro catene di approvvigionamento per mantenere la loro competitività e garantire un flusso operativo ininterrotto. In questo contesto, l'obiettivo centrale delle aziende è di allineare la produzione con la domanda, riducendo al contempo i costi e aumentando la soddisfazione dei clienti [55].

Quindi, diventa importante per le aziende considerare l'adozione di concetti come la *lean supply chain* e l'*agile supply chain*. Questi paradigmi offrono approcci strategici per ottimizzare la catena di approvvigionamento e garantire allo stesso tempo una maggiore flessibilità e capacità di adattamento alle fluttuazioni della domanda. La Figura 14

fornisce una panoramica degli attributi specifici dei due paradigmi. In particolare, risulta evidente come la *lean supply chain* si concentra sull'eliminazione degli sprechi e sull'ottimizzazione dei processi per ridurre i costi, mentre l'*agile supply chain* punta a migliorare la reattività e la capacità di adattamento alle esigenze dei clienti [56].

Le organizzazioni che riescono a modificare con successo le proprie catene di approvvigionamento in linea con questi paradigmi possono ottenere una maggiore competitività, una gestione più efficiente delle risorse e una migliore soddisfazione del cliente.

Distinguishing attributes	Lean supply	Agile supply
Typical products	Commodities	Fashion goods
Marketplace demand	Predictable	Volatile
Product variety	Low	High
Product life cycle	Long	Short
Customer drivers	Cost	Availability
Profit margin	Low	High
Dominant costs	Physical costs	Marketability costs
Stockout penalties	Long-term contractual	Immediate and volatile
Purchasing policy	Buy materials	Assign capacity
Information enrichment	Highly desirable	Obligatory
Forecasting mechanism	Algorithmic	Consultative

Figura 14. Le differenze tra Lean e Agile [55]

### 3.4.1 Lean Supply Chain

La lean supply chain, spesso denominata semplicemente "Lean," è un approccio gestionale che trae le sue radici dal sistema di produzione Toyota, noto come *Toyota Production System* (TPS) (Christopher, Towill, 2001). Questo sistema fu sviluppato in Giappone da Taiichi Ohno e Shigeo Shingo durante gli anni '50 e '60 come risposta alle sfide di produzione e ai limiti delle pratiche di gestione occidentali. La Toyota riuscì a trasformare il TPS in un modello di riferimento di eccellenza operativa, dimostrando che era possibile ridurre gli sprechi, migliorare l'efficienza e garantire una qualità elevata in un contesto di produzione.

Sebbene, presenti notevoli vantaggi, la Lean è particolarmente adatta ai contesti in cui la domanda è relativamente stabile e prevedibile, e dove la competizione non si basa sulla differenziazione. Questo perché i principi fondamentali di questo approccio si concentrano sull'ottimizzazione dei flussi di materiale e informazioni, sull'eliminazione degli sprechi e sulla produzione "Just In Time" (JIT) [58].

La lean supply chain ha lo scopo di eliminare gli sprechi, noti come "Muda" in giapponese [59]. Gli sprechi possono includere sovrapproduzione, eccesso di inventario, tempi di attesa, movimenti e trasporti inutili, lavorazioni eccessive, difetti di produzione, sottoutilizzo delle competenze dei dipendenti e processi inefficienti [57, 59]. L'obiettivo è identificare e rimuovere queste attività non produttive e inutili per ridurre i costi e migliorare l'efficienza.

Il concetto chiave è la gestione "Pull", che si basa sulla domanda effettiva del cliente anziché sulla sua previsione futura. Infatti, ogni passaggio del processo produttivo, dalla produzione alla distribuzione, è sincronizzato con la richiesta del cliente [56]. Questo significa che i prodotti, le materie prime o i semilavorati vengono prodotti o consegnati solo quando è richiesto dal cliente, evitando la sovrapproduzione e l'eccesso di inventario. Tutti gli elementi necessari, che siano materie prime o prodotti finiti, devono essere disponibili immediatamente nel momento in cui vengono richiesti, secondo il principio JIT. Ciò consente di ridurre al minimo l'inventario e di evitare il blocco di risorse finanziarie in prodotti immagazzinati per lungo tempo.

### 3.4.2 Agile Supply Chain

L'Agile supply chain ha origine nel mondo del software e dello sviluppo tecnologico, dove il termine "agile" indicava una metodologia che promuovesse la flessibilità, la collaborazione e la capacità di rispondere rapidamente ai cambiamenti nei requisiti del progetto [56].

Negli anni, l'approccio agile è stato applicato anche nella gestione della supply chain per affrontare la crescente complessità delle catene di approvvigionamento globali e la necessità di rispondere alle esigenze mutevoli dei clienti [60].

Questo approccio è particolarmente adatto a settori in cui la domanda è volatile, i cicli di vita dei prodotti sono brevi e la personalizzazione è importante. Ad esempio, è

ampiamente utilizzata nell'industria dell'abbigliamento e della moda, dove le tendenze cambiano rapidamente [55].

L'approccio agile è guidato da quattro principi chiave che lo rendono dinamico e altamente adattabile alla gestione della catena di approvvigionamento: collaborazione, flessibilità, visibilità e risposta rapida [61].

Infatti, questo approccio richiede una stretta *collaborazione* tra tutti gli attori della catena di approvvigionamento, inclusi fornitori, produttori e distributori. La condivisione in tempo reale delle informazioni e la *visibilità* completa dei flussi di materiale e informazioni lungo tutta la catena consentono un'identificazione tempestiva dei problemi e l'implementazione di misure correttive per adattarsi *rapidamente* ai cambiamenti del mercato. Questa *flessibilità* può tradursi nella capacità di cambiare gli attori, riconfigurare le linee di produzione o modificare i piani di distribuzione in tempi brevi [60].

## Capitolo 4 - Additive Manufacturing e Supply Chain

Il quarto capitolo di questa tesi costituisce un punto importante nell'analisi dell'interazione tra l'Additive Manufacturing (AM) e la gestione della catena di approvvigionamento (Supply Chain) e permette di rispondere alla seconda domanda di ricerca: *Quali impatti la diffusione dell'Additive Manufacturing ha sulla gestione della supply chain e come le aziende stanno adattando le loro strategie logistiche per sfruttare al meglio questa tecnologia?*

L'attenzione si sposta quindi sull'evoluzione della Supply Chain attraverso l'integrazione dell'AM, illustrando come quest'ultima abbia aperto a nuove prospettive. Nel paragrafo 4.1 si esplorano le principali evoluzioni che ha introdotto la nuova tecnologia, tra cui la personalizzazione di massa e l'evoluzione dei concetti di Lean Supply Chain e Agile Supply Chain. Nel paragrafo 4.2, si analizzano le nuove strutture di Supply Chain che hanno incorporato l'AM, comprese quelle centralizzate, decentralizzate, intermedie o ad hub e domestiche. Successivamente, nel paragrafo 4.3, si affrontano i cambiamenti organizzativi necessari per adeguarsi all'AM, compresa la ristrutturazione delle relazioni con i fornitori e la riformulazione del flusso produttivo. Il paragrafo 4.4 si concentra sui vantaggi legati all'AM, come ad esempio quelli legati alle economie di scala ed al ridotto time-to-market. Infine, i punti di applicazione specifici di questa nuova tecnologia vengono analizzati nel paragrafo 4.5, con particolare attenzione all'ambito del R&D e del Rapid Prototyping.

### 4.1 L'evoluzione della Supply Chain: integrazione AM

L'obiettivo principale di molte aziende è semplificare la gestione della loro Supply Chain, poiché una catena di approvvigionamento più snella può portare a vantaggi strategici significativi, tra cui: riduzione dei costi operativi, maggiore produttività ed aumento dei profitti [48, 53].

L'Industria 4.0 ha rivoluzionato il panorama delle catene di approvvigionamento, portando una serie di innovazioni tecnologiche che hanno lo scopo di migliorare l'efficienza, la flessibilità e la reattività di tali catene [7]. Tra queste tecnologie, l'Additive Manufacturing, o fabbricazione additiva, si è affermata come uno strumento chiave per semplificare e migliorare significativamente i processi di gestione delle catene di fornitura.

### 4.1.1 Personalizzazione di massa

La personalizzazione di massa rappresenta un concetto cruciale nel panorama moderno del business. In diversi settori, la capacità di offrire prodotti personalizzati è diventata fondamentale per restare competitivi sul mercato e soddisfare le esigenze specifiche dei clienti [62].

Fino ad oggi, le aziende che hanno deciso di intraprendere la personalizzazione di massa per i propri prodotti, hanno dovuto interfacciarsi con la produzione modulare, la quale richiede una Supply Chain altamente integrata, coinvolgendo e integrando, spesso, componenti provenienti da fornitori diversi [63].

In contrasto, la fabbricazione additiva offre una soluzione alternativa. Questa tecnologia consente di ottenere tutti i vantaggi della personalizzazione di massa, ma con un approccio più flessibile [66]. La stampa 3D si basa su materiali di consumo standard acquistabili da diversi fornitori. Inoltre, rispetto a processi di personalizzazione di massa basati su assemblaggio manuale, l'Additive Manufacturing è un processo automatizzato che richiede solo un file CAD per la produzione. Questo rende la gestione della fabbricazione additiva più semplice da coordinare rispetto alla personalizzazione di massa tradizionale, offrendo un notevole vantaggio competitivo alle aziende che adottano questa tecnologia [5].

Inoltre, la produzione tradizionale associa all'aumento della complessità e/o della personalizzazione delle parti prodotte un corrispettivo aumento dei costi per la loro realizzazione [4]. Come mostrato nella ricerca effettuata da Brett e Conner (figura 13), la curva che rappresenta i costi relativi alle macchine tradizionali cresce esponenzialmente all'aumentare della complessità/personalizzazione dell'output generato, mentre i costi associati alle macchine additive non variano all'aumentare di tali variabili e possono essere rappresentati mediante una retta parallela rispetto all'asse delle ascisse.

La Figura 15 mostra che le due rappresentazioni dei costi si intersecano in un punto, il breakeven point, o punto di pareggio. A sinistra di questo punto risulterà più conveniente produrre mediante tecniche tradizionali, mentre a destra converrà utilizzare la tecnologia additiva. Risulta evidente che all'aumentare della personalizzazione richiesta, la fabbricazione additiva possa garantire un vantaggio in termini di costi piuttosto notevole.

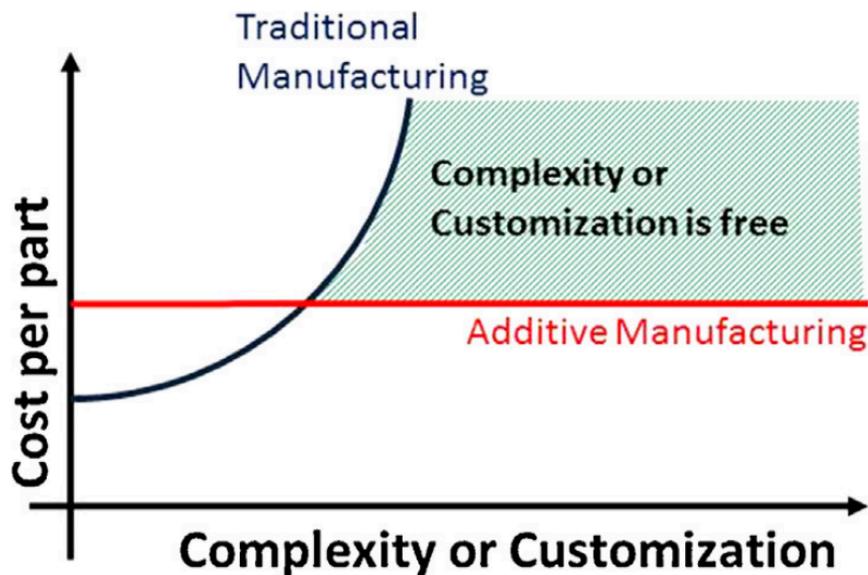


Figura 15. Andamento dei costi all'aumentare della Complessità/Personalizzazione [4]

#### 4.1.2 Lean Supply Chain 2.0

Come visto in precedenza, la Lean supply chain ha lo scopo di identificare ed eliminare gli sprechi per ridurre i costi e migliorare l'efficienza della catena di approvvigionamento. Il concetto chiave è, quindi, la gestione "Pull" [56]: tutti gli elementi necessari, che siano materie prime o prodotti finiti, devono essere disponibili immediatamente nel momento in cui vengono richiesti, secondo il principio Just in Time, riducendo al minimo l'inventario [58].

Tuttavia, grazie all'integrazione dell'Additive Manufacturing il principio JIT potrà essere ampliato, oltre che all'inventario, alla stessa produzione [62, 64]. Infatti, la fabbricazione additiva elimina i semilavorati (WIP) realizzando l'oggetto finale attraverso un unico processo. Le aziende dovranno soffermarsi nel creare e conservare quanti più file CAD possibile, i quali rappresentano le basi per la realizzazione dei nuovi prodotti [64]. Ciò comporta una notevole riduzione dei costi non solo in termini di approvvigionamento e gestione del magazzino, ma anche in termini di costi di gestione di utensili per la lavorazione dei WIP e settaggio delle macchine per prodotti differenti [62].

### 4.1.3 Agile Supply Chain 2.0

L'agile supply chain opera in mercati in cui la domanda è volatile, i cicli di vita dei prodotti sono brevi e la personalizzazione è importante [55], rendendo la catena di approvvigionamento collaborativa tra gli attori che la compongono, flessibile e in grado di reagire prontamente alle sollecitazioni ricevute dal mercato [60].

Grazie all'Additive Manufacturing è possibile effettuare uno step successivo a quanto attualmente previsto da questo approccio. Infatti, la fabbricazione additiva consente di avvicinare il prodotto al cliente finale e permette di gestire la produzione attraverso il *make-to-order* [63, 66]. Il concetto di *make-to-order* è una strategia di produzione in cui un prodotto viene creato solo dopo aver ricevuto un ordine specifico da un cliente: l'azienda non tiene in magazzino prodotti finiti, ma avvia il processo di produzione solo quando riceve una richiesta da parte del cliente [60].

## 4.2 Nuove strutture: Supply Chain e AM

L'integrazione dell'Additive Manufacturing all'interno delle filiere logistiche sta ridefinendo radicalmente la struttura delle supply chain [66]. Il suo impatto varia a seconda del livello logistico coinvolto. In altre parole, le configurazioni delle supply chain basate sull'Additive Manufacturing (AM) dipendono dalla posizione in cui vengono implementate queste tecnologie all'interno della catena di approvvigionamento. Di conseguenza, così come identificato da Gallinaro all'interno del suo studio [67], emergono diverse configurazioni di supply chain basate sull'AM, ognuna adatta a specifici contesti e obiettivi di produzione. In particolare, Gallinari sostiene che la fabbricazione additiva ha dato vita a quattro diverse configurazioni di supply chain:

- SC-AM con struttura centralizzata;
- SC-AM con struttura decentralizzata;
- SC-AM con struttura intermedia o ad hub;
- SC-AM con struttura domestica;

## 4.2.1 SC-AM con struttura centralizzata

Nella configurazione con struttura centralizzata, come visibile in Figura 16, le tecnologie additive sono implementate nello stabilimento principale (“OEM”, ) e affiancano la produzione convenzionale al fine di coprire eventuali oscillazioni della domanda o testare prototipi e progetti. Questo approccio è particolarmente indicato per la produzione di parti altamente specializzate o personalizzate [67].

In questa configurazione, la fabbricazione additiva sostituisce il magazzino di tutti quei prodotti che non presentano stabilità nella domanda o che non vengono richiesti con frequenze elevate. Questo riduce i costi legati al magazzino per quanto riguarda spare parts e prodotti destinati al cliente finale. Inoltre, La produzione avviene in un'unica sede, dalla quale le parti vengono distribuite ai clienti o ai punti di consumo [109].

Sebbene la struttura centralizzata consenta la riduzione dell’inventario disponibile e conseguentemente dei costi legati al magazzino, le parti realizzate mediante fabbricazione additiva devono ancora essere trasportate a valle, aumentando il time-to-market e non sfruttando a pieno le potenzialità di questa nuova tecnologia.

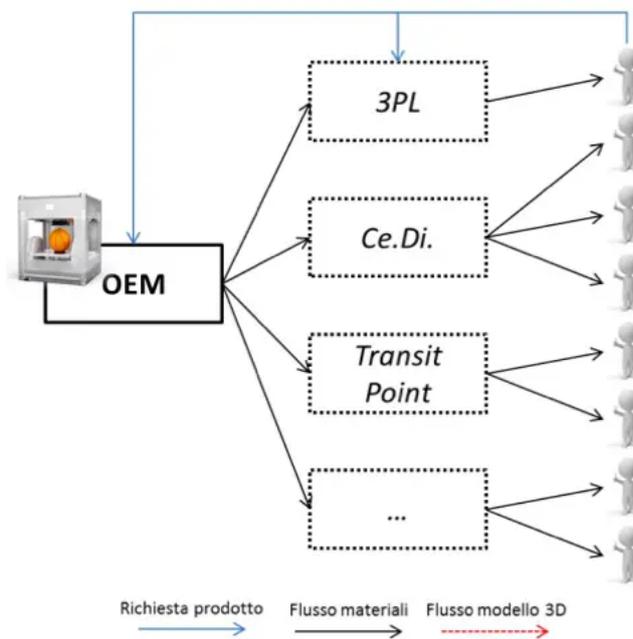


Figura 16. Struttura centralizzata SC-AM [109]

## 4.2.2 SC-AM con struttura decentralizzata

Questa configurazione può essere implementata con successo solamente in quelle situazioni in cui la domanda di prodotti è sufficientemente elevata da giustificare l'investimento in apparecchiature di stampa 3D per ciascuna sede di servizio coinvolta [67].

Le tecnologie additive, come visibile in Figura 17, sono implementate in tutte le strutture, a valle della supply chain, che originariamente si occupavano della distribuzione, le quali inizieranno a produrre e avvicineranno sempre più il prodotto finale al cliente, il quale potrà beneficiare di svariati vantaggi, tra cui tempi di consegna ridotti e una differente personalizzazione per sede di servizio [109].

Sebbene l'acquisto di stampanti 3D per ciascuna sede possa inizialmente comportare un certo costo di capitale, i benefici derivanti dalla riduzione dei costi logistici e degli stock [19], insieme all'ottimizzazione dei tempi di risposta ai clienti, possono rapidamente ripagare tale investimento.

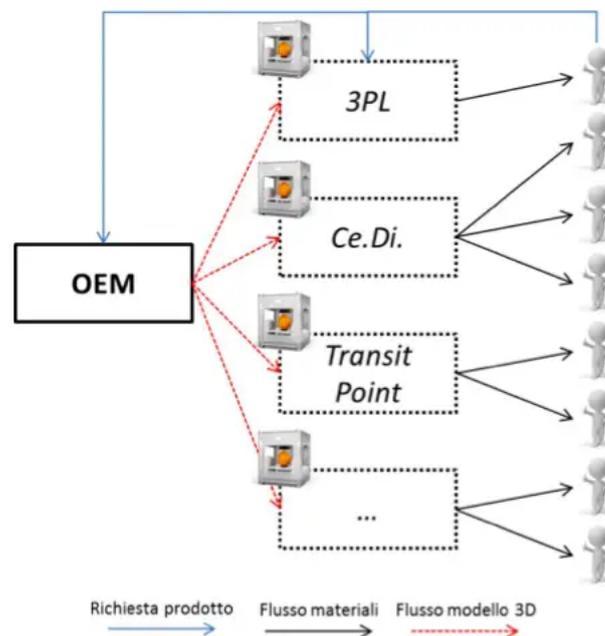


Figura 17. Struttura decentralizzata SC-AM [109]

### 4.2.3 SC-AM con struttura intermedia o ad hub

La struttura decentralizzata è, in un certo senso, la naturale evoluzione della struttura centralizzata, in quanto riesce a sfruttare a pieno tutti i vantaggi legati alla nuova tecnologia eliminando i limiti imposti dalla produzione tradizionale [67].

Tuttavia, sono presenti anche configurazioni intermedie tra le due proposte, che permettono di sfruttare i benefici dell'Additive Manufacturing senza investire sin da subito un'ingente somma di capitale nelle stampanti 3D [108].

Ad esempio, la configurazione ad hub richiede un numero inferiore di stampanti rispetto a quella decentralizzata, in quando la produzione è dislocata in centri di domanda regionali che comprendono più sedi di servizio.

Nella Figura 18, sono illustrate diverse configurazioni di catene di approvvigionamento basate sul tasso di decentralizzazione ( $Deg$ ). Un valore di  $Deg$  pari a 0 rappresenta una configurazione completamente decentralizzata, mentre un valore di  $Deg$  pari a 1 indica una configurazione centralizzata. I valori intermedi rappresentano, invece, configurazioni ibride di supply chain [108].

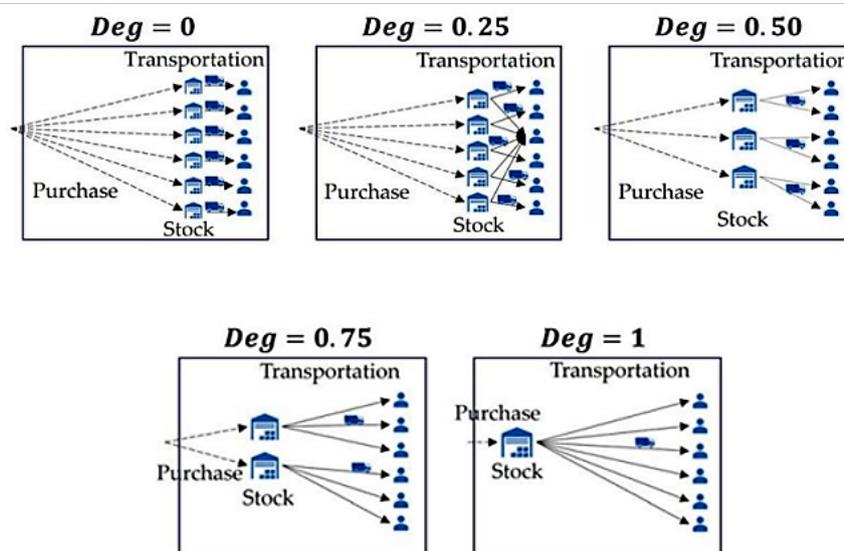


Figura 18. Configurazioni SC-AM al variare del tasso di decentralizzazione [108]

#### 4.2.4 SC-AM con struttura domestica

Sebbene i limiti attuali dell'Additive Manufacturing suggeriscano che la struttura domestica non possa essere applicabile a tutti i prodotti e i materiali nel prossimo futuro, è lecito immaginare che quanto prima, si possa raggiungere questa condizione, grazie al continuo sviluppo tecnologico [36].

Infatti, la spinta verso la produzione potrebbe estendersi fino al livello più basso della catena di approvvigionamento, ossia il consumatore finale [66].

La figura 19 fornisce una panoramica di ciò che comporterebbe tale configurazione. In questo contesto, i consumatori, essendo forniti di una stampante 3D, avrebbero la capacità di personalizzare autonomamente i prodotti desiderati, apportando modifiche direttamente al modello di base fornito dal produttore. Di conseguenza, l'azienda si concentrerebbe principalmente sulla vendita di modelli originali e materiali per la stampa, nonché sulla loro distribuzione ai clienti. Questa configurazione potrebbe comportare cambiamenti significativi nel flusso dei materiali, che non sarebbero più costituiti principalmente da prodotti finiti, ma che includerebbero prevalentemente materie prime [109].

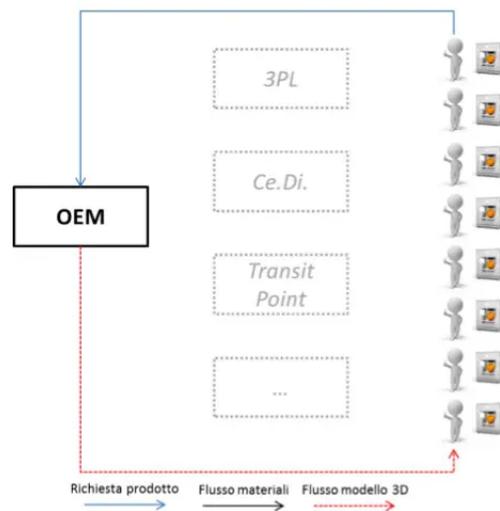


Figura 19. Struttura domestica SC-AM [109]

## 4.3 Cambiamenti organizzativi

Per consentire alle nuove tecnologie di realizzare appieno il suo potenziale ed essere implementate efficacemente all'interno dei processi aziendali, Bessant sostiene che sono essenziali alcuni cambiamenti organizzativi significativi [68]. Questi cambiamenti includono la ristrutturazione delle relazioni con i fornitori, spostandosi verso forme più collaborative e orientate alla collaborazione, e la riformulazione dell'intero flusso produttivo [69].

### 4.3.1 Ristrutturazione delle relazioni con i fornitori

Prima dell'avvento dell'Additive Manufacturing, le aziende avevano spesso bisogno di affidarsi a una rete di fornitori diversi per ottenere parti o componenti specifici necessari per la produzione. Tuttavia, con l'introduzione della nuova tecnologia di stampa 3D, le aziende stanno progressivamente acquisendo la capacità di produrre determinate parti internamente, riducendo la dipendenza dai fornitori esterni [70]. Questo comporta un maggiore controllo sulla produzione e una riduzione dei tempi di consegna, contribuendo a migliorare la flessibilità aziendale [48].

Inoltre, l'AM sta spingendo verso una maggiore collaborazione con i fornitori rimasti coinvolti nel processo. Poiché la fabbricazione additiva richiede un'attenta calibrazione e gestione dei materiali utilizzati, le aziende stanno sviluppando relazioni più strette e collaborative con i loro fornitori di macchine e di materiali per la produzione additive, al fine di garantire la qualità ricercata [69].

L'Additive Manufacturing sta inoltre influenzando il processo di selezione dei fornitori. Le aziende valutano con chi collaborare in base alla capacità di soddisfare le esigenze legate a questa nuova tecnologia, tra cui la fornitura di materiali di alta qualità, di macchine AM all'avanguardia e di supporto tecnico rapido e tempestivo.

### 4.3.2 Riformulazione del flusso produttivo

Quando la fabbricazione additiva (AM) rimpiazza i metodi di produzione convenzionali all'interno di una catena di fornitura, si verifica una tendenza a spostare il punto di penetrazione degli ordini dei clienti, o order penetration point (OPP), lungo la catena del

valore [71] (Figura 20). Questo cambiamento genera uno spostamento parallelo della logica di produzione, passando da "make-to-stock" a "make-to-order" [66].

L'Order Penetration Point è il punto critico nella catena di produzione in cui si attua la differenziazione del prodotto. Questo significa che alcune fasi di produzione vengono ritardate (strategia di “postponement”) fino a quando non si conoscono i dettagli esatti delle esigenze dei clienti, come il tipo di prodotto desiderato, il luogo e il momento della consegna [73].

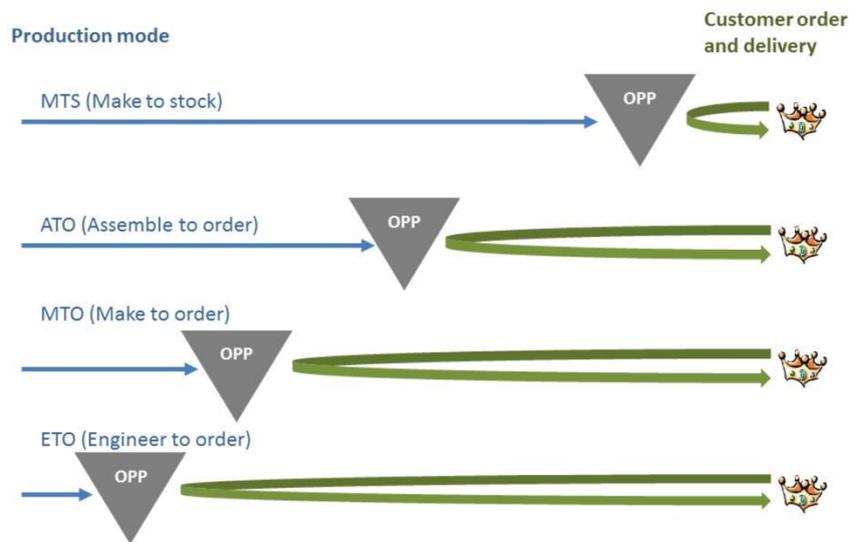


Figura 20. Order Penetration Point (OPP) [66]

Le strategie di postponement rendono le catene di fornitura in grado di gestire l'incertezza legata alla domanda [73]. Infatti, durante il periodo di postponement, è possibile ottenere informazioni più accurate e questo aumento della conoscenza permette a tutta la catena di fornitura di adattarsi con flessibilità alle richieste specifiche del cliente, soddisfacendo così in modo efficiente la domanda.

Il "postponement" costituisce un elemento cruciale nell'ambito della "mass customization" secondo quanto emerso dalla ricerca di Yang et alii (2004). In questo contesto, l'Additive Manufacturing (AM) si configura come il mezzo attraverso il quale i clienti vengono pienamente integrati nel processo aziendale di creazione del valore, evolvendo questa interazione in una forma di co-creazione [74]. Infatti, l'Additive Manufacturing, non comportando costi supplementari in base al grado di personalizzazione richiesto e spostando l'OPP alla fase di progettazione, rende possibile per l'impresa effettuare strategie di “pure customization” [75].

## 4.4 Additive Manufacturing ed economie di scala

Le tecnologie additive non comportano costi aggiuntivi legati alla diversificazione della produzione, principalmente grazie all'assenza di costi per l'impostazione e la ri-progettazione dei processi. Questo aspetto consente un'efficienza produttiva anche per la realizzazione di singole unità o per la produzione di piccoli lotti di prodotti [5]. La tecnologia additiva offre, quindi, una soluzione al dibattito tra “economia di scala” ed “economia di scopo”.

Se da un lato, le macchine utilizzate per la produzione tradizionale richiedono elevati volumi di prodotti per raggiungere l'efficienza produttiva, le tecnologie additive consentono di raggiungere livelli di produzione efficiente con un numero molto limitato di unità prodotte, estendendo quindi la disponibilità di strutture di produzione efficienti [76].

La Figura 21 rappresenta il punto in cui i costi associati alle due tipologie di produzione, convenzionale e additiva, si intersecano. A destra del “breakeven point”, l'utilizzo delle tecnologie convenzionali risulta conveniente, poiché sfruttano le economie di scala. Al contrario, a sinistra del punto di pareggio, le tecnologie additive risultano più efficienti. Questo conferma che le tecnologie additive richiedono un basso livello di investimento iniziale.

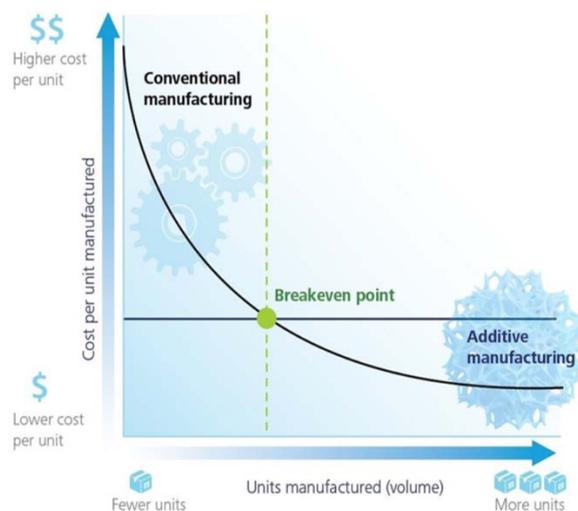


Figura 21. Breakeven point Additive e Conventional Manufacturing [76]

Di conseguenza, si potrebbe dedurre che la produzione additiva risulta essere efficiente principalmente per produzioni di unità singole o piccoli lotti, mentre la produzione convenzionale diventa efficiente quando si lavorano grandi lotti di produzione, sfruttando appunto le economie di scala.

Tuttavia, a differenza di quanto rappresentato nella Figura 21, secondo Ruffo (2016) la curva dei costi unitari medi associata ai prodotti additivi non può rappresentata da una linea retta parallela all'asse delle ascisse, ma segue anch'essa una curva, anche se è caratterizzata da una minore pendenza di decrescita rispetto alla curva dei costi unitari medi associati alla produzione convenzionale [77].

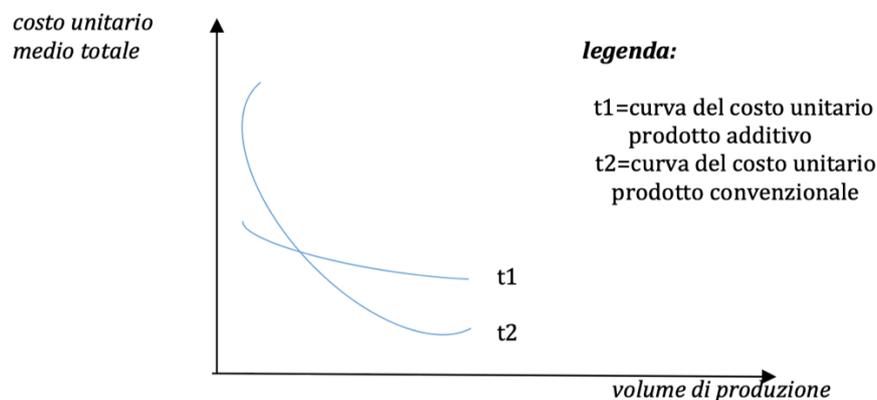


Figura 22. Curve dei costi unitari del prodotto convenzionale e additivo [74]

Questa discrepanza nei tassi di decrescita dei costi medi unitari tra i prodotti additivi e quelli convenzionali è attribuibile principalmente a due fattori [67]:

- al diverso tasso di produzione (throughput) delle macchine, attualmente molto più basso per le macchine additive rispetto a quelle convenzionali;
- dai costi e dai tempi necessari per il riprocessamento dei prodotti additivi a causa delle sfide legate alla standardizzazione qualitativa.

La figura 22 si pone in contrasto con l'idea, comune in molti studi sull'argomento, che le macchine additive non siano in grado di sfruttare economie di scala e quindi siano efficienti solo per piccoli volumi produttivi, con una diminuzione della loro convenienza all'aumentare della domanda.

Infatti, le macchine additive, comportando costi fissi per le aziende che le acquistano e le utilizzano, possono sfruttare economie di scala. Tuttavia, ad oggi, queste economie di

scala sono limitate a causa delle restrizioni tecniche a cui devono sottostare le macchine stesse, tra cui il limitato tasso di produzione. Quando la domanda raggiunge livelli elevati, è necessario aumentare la velocità di produzione e, in queste circostanze, date le attuali limitazioni tecnologiche, le imprese sono costrette ad optare per le tecnologie convenzionali.

Tuttavia, Gallinaro (2019) afferma che avanzamenti futuri nel campo tecnologico dovrebbero verosimilmente contribuire ad accelerare il throughput delle macchine additive, stabilizzare la qualità dei prodotti ottenuti con questa tecnologia e ridurre i costi e i tempi di rilavorazione. Questi sviluppi potrebbero portare a una curva dei costi unitari del prodotto additivo che si inclina ulteriormente, consentendo un raggiungimento più rapido delle economie di scala. Di conseguenza, le tecnologie additive potrebbero diventare competitive in una gamma più ampia di contesti, non limitandosi più alla produzione di unità singole o piccoli lotti di prodotti [74].

#### 4.4.1 Vantaggi nei costi

La stampa 3D influisce sulle catene di approvvigionamento in molteplici modi, dalla digitalizzazione dei magazzini alla produzione locale, consentendo a molte aziende di implementare questa tecnologia di produzione per innovare il proprio business, il trasporto, il magazzino e ottenere una maggiore flessibilità nell'approvvigionamento [66][78].

L'impatto della stampa 3D sulle catene di approvvigionamento va dalla digitalizzazione dei magazzini alla produzione locale. Infatti, offre alle aziende l'opportunità di introdurre innovazioni nei processi legati al trasporto e alla gestione del magazzino, contribuendo a ottenere una maggiore flessibilità nell'approvvigionamento [66, 78]. Quindi, l'impatto della fabbricazione additiva sulla supply chain va oltre la produzione e coinvolge tutti i livelli della catena stessa.

Nel 2020, una ricerca condotta dal MIT sulle implicazioni della stampa 3D sulla catena di approvvigionamento globale ha prodotto risultati rilevanti, mettendo in luce i costi associati alle diverse fasi della catena di approvvigionamento prima e dopo l'implementazione di tale tecnologia (Figura 23). L'adozione dell'Additive Manufacturing ha consentito alle aziende di tagliare drasticamente i costi di trasporto, riducendo dell'85% le spese associate all'invio di prodotti finiti dall'Asia. Inoltre, i costi

di gestione dell'inventario hanno subito una decurtazione del 17%, poiché la produzione on-demand resa possibile dalla stampa 3D ha eliminato la necessità di immagazzinare grandi quantità di merci [66]. Nel complesso, questa trasformazione ha comportato un notevole risparmio del 70% lungo l'intera catena di approvvigionamento [19].

### Supply Chain Cost component

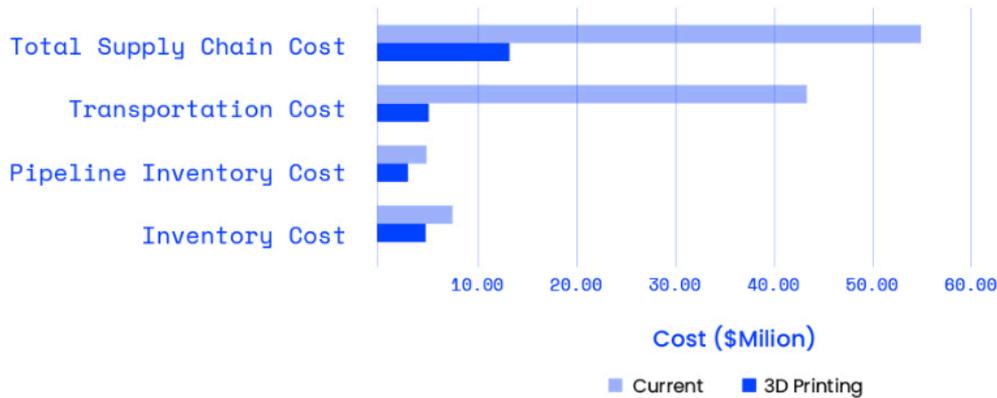


Figura 23. Costi della catena di approvvigionamento pre/post implementazione AM [19]

### 4.5 Punti di applicazione dell'Additive Manufacturing

Le aziende sfruttano la stampa 3D principalmente per la creazione di prototipi di nuovi prodotti, una pratica diventata sempre più comune di recente. Tuttavia, queste aziende stanno anche cercando di estendere l'uso di questa tecnologia ad altri settori della catena di produzione [80]. La maggioranza delle attività svolte mediante l'implementazione della stampa 3D è focalizzata nella fase di riproduzione all'interno della catena del valore (R&D, Rapid Prototyping, Sviluppo del prodotto, Produzione diretta e indiretta). L'uso della fabbricazione additiva nelle altre fasi è limitato, ma si sta osservando una crescente adozione nelle aree delle vendite e dello sviluppo aziendale [79]. In particolare, la Figura 24 mostra come alla fase di riproduzione sia associato il 52% delle attività in cui è implementata la fabbricazione additiva, mentre la fase di produzione e postproduzione contano rispettivamente il 19% e 29% del totale.

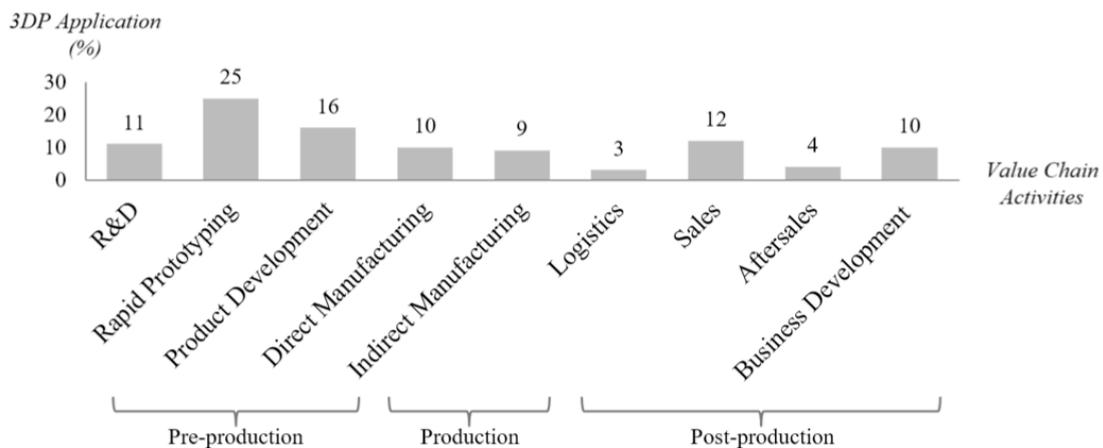


Figura 24. Applicazione della stampa 3D [79]

#### 4.5.1 Applicazione dell'AM in attività di R&D

L'introduzione della fabbricazione additiva ha aperto nuove possibilità per lo sviluppo di design innovativi attraverso il processo di ricerca e sviluppo (R&D). Sebbene, in passato le aziende erano riluttanti ad abbandonare le loro vecchie modalità di pensare al design, questa mentalità sta cambiando favorita dall'ingresso di nuovi attori nei settori industriali [79]. Le piccole imprese abbracciano il concetto di "Libertà di progettazione" e grazie all'applicazione dell'Additive Manufacturing hanno aumentato la competizione all'interno del mercato. Questo sta spingendo le grandi aziende ad assecondare questa tendenza ed adottare un approccio più innovativo al design [63]. L'implementazione della fabbricazione additiva agevola le imprese nell'ampliare la loro visione oltre il proprio settore della catena del valore. Questa prospettiva rappresenterà la tendenza del futuro, poiché molte aziende sceglieranno di esplorare nuovi mercati e sfruttare le opportunità di investimento possibili grazie all'adozione della stampa 3D.

KPMG, una delle più grandi e famose aziende di consulenza al mondo, attraverso la pubblicazione di due report ("Global Manufacturing Outlook" (GMO) e "Global Metals and Mining Outlook" (GMMO)) ha fornito alcuni dettagli preziosi sulle opportunità future derivanti dalla stampa 3D e ha reso possibile l'analisi delle relative tendenze di investimento in R&D [81].

Come visibile in Figura 25, KPMG ha riscontrato che il 27% delle organizzazioni intervistate ha pianificato di destinare tra il 6% e il 10% del fatturato alla fase di ricerca e allo sviluppo nei prossimi due anni. Inoltre, il 16% di coloro che hanno partecipato al

sondaggio ha dichiarato che la loro spesa per R&D sarebbe stata superiore al 10% del fatturato.

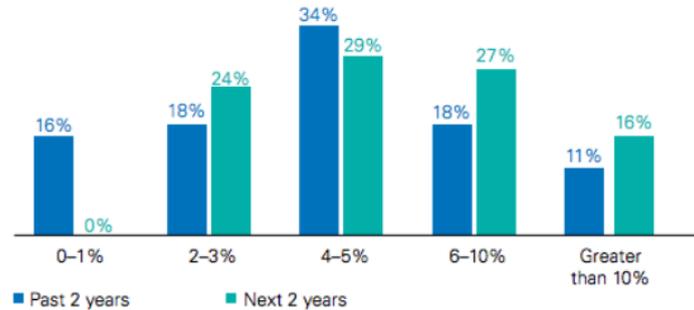


Figura 25. Investimento in R&D passato e futuro [81]

Infine, i risultati del sondaggio GMMO hanno confermato che la stampa 3D rimane un punto di interesse significativo, con oltre il 25% delle aziende che prevedono di effettuare un investimento in questa tecnologia nei prossimi due anni (Figura 26).

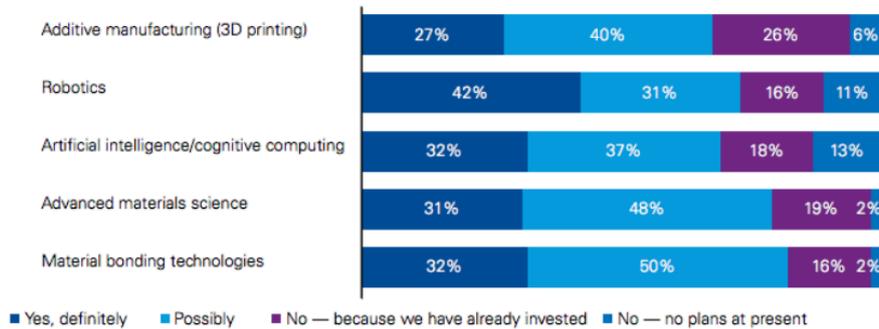


Figura 26. Investimento futuro in nuove tecnologie [81]

#### 4.5.2 Applicazione dell'AM in attività di Rapid Prototyping

La continua evoluzione della tecnologia di stampa 3D sta influenzando notevolmente il processo di prototipazione rapida, permettendo di produrre parti funzionali e complesse direttamente da file CAD. Secondo uno studio condotto da Bak (2003), la stampa 3D non solo offre la possibilità di effettuare un processo di produzione noto come produzione rapida ma offre anche numerosi vantaggi economici rispetto ai metodi tradizionali di produzione [64].

In primo luogo, l'Additive Manufacturing utilizza solo la quantità di materiale necessaria alla produzione dell'oggetto, riducendo gli sprechi e i costi di smaltimento o riciclo associati ai metodi di produzione convenzionali. Inoltre, la fabbricazione di oggetti di varie dimensioni da una singola fonte di materiale, anziché da un inventario di tagli predefiniti, permette di ridurre ulteriormente i costi di gestione dell'inventario.

La produzione rapida elimina la necessità di competenze specifiche, tempo e costi associati alla progettazione, lavorazione e assemblaggio di parti realizzate attraverso metodi tradizionali. Inoltre, grazie alla produzione digitale, vi è una minore probabilità di errori umani durante il processo di controllo qualità [82].

La stampa 3D ha aperto la strada non solo alla prototipazione rapida, ma anche alla produzione rapida di componenti complessi e funzionali, trasformando gradualmente il settore manifatturiero [83].

Il sondaggio riportato nella Figura 27 è stato condotto per valutare l'adozione dei modelli di produzione rapida (RP) in vari settori industriali. I risultati del sondaggio indicano una tendenza positiva nell'utilizzo delle tecnologie di stampa 3D e prototipazione rapida come alternativa ai sistemi di prototipazione tradizionali. Tali risultati indicano che la produzione rapida sta gradualmente affermandosi come una soluzione valida per le esigenze di prototipazione e produzione personalizzata in diversi settori industriali. Questa tendenza supporta le affermazioni di esperti del settore, come Wohlers (2004), che sottolinea il potenziale impatto della stampa 3D nella produzione di beni finiti. Tali risultati indicano che la produzione rapida sta gradualmente affermandosi come una soluzione valida per le esigenze di prototipazione e produzione personalizzata in diversi settori industriali [65].

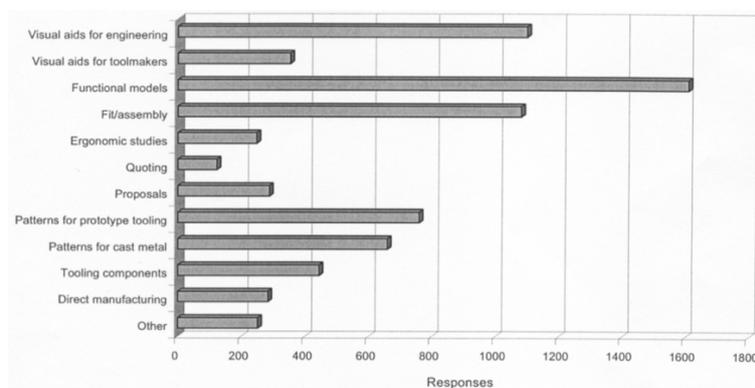


Figura 27. Applicazioni per Rapid Prototyping [65]

## Capitolo 5 – Il Reshoring e la sua connessione con l'AM

Il quinto capitolo di questa tesi rappresenta un punto di svolta nell'analisi delle dinamiche economiche e produttive delle multinazionali, con un focus specifico sul Reshoring e sulla sua stretta connessione con l'Additive Manufacturing (AM). Lo studio affrontato di seguito permette di far chiarezza relativamente alla terza domanda di ricerca: *In che misura l'adozione dell'Additive Manufacturing sta influenzando il fenomeno di reshoring nell'industria e quali sono le implicazioni per la localizzazione delle attività produttive?* Per rispondere a tale domanda, in questo capitolo si esplorano inizialmente i concetti di Offshoring e Reshoring, con particolare enfasi sulle sfide e le opportunità che questi fenomeni comportano. Il paragrafo 5.2 si dedica all'Offshoring, analizzando i vantaggi che comporta, ma anche i rischi e le criticità ad esso associati. Successivamente, il paragrafo 5.3, approfondisce il concetto di Reshoring, concentrandosi sulle motivazioni della sua applicazione in Italia e le differenze rispetto agli altri paesi. Nel paragrafo 5.4, l'attenzione si sposta sulla connessione tra il Reshoring e l'AM, analizzando la correlazione tra questi due fenomeni e il loro impatto sulla produzione e la catena di approvvigionamento.

### 5.1 Offshoring vs Reshoring

Negli ultimi decenni, le imprese manifatturiere hanno adottato una tendenza allo spostamento delle loro operazioni produttive, creando catene di fornitura sempre più estese. In questo contesto, i vertici dell'azienda sono rimasti ancorati al paese di origine distaccandosi, però, dai siti di produzione, i quali sono invece stati collocati nei paesi in via di sviluppo, facilitati da costi del lavoro inferiori e attratti dalla possibilità agevolata di accesso alle materie prime [86].

L'offshoring è quindi una pratica che ha rivestito un ruolo significativo nel campo del Business Internazionale e che ha condotto le multinazionali a spostare le proprie operazioni di produzione, e talvolta anche funzioni aziendali come i servizi di assistenza clienti, in paesi esteri per oltre un secolo [85]. Questa tendenza ha prevalentemente coinvolto paesi orientali come India, Cina, Bangladesh e paesi emergenti, dove la disponibilità di manodopera a basso costo ha rappresentato il principale motore trainante di questo fenomeno. Inoltre, l'avanzamento delle tecnologie dell'informazione ha

agevolato questa frammentazione internazionale delle attività aziendali, soprattutto per quelle operazioni a basso valore aggiunto [87].

Anche se questa strategia ha portato a notevoli vantaggi economici, le supply chain lunghe e dislocate in differenti parti del mondo hanno dimostrato di essere fragili e poco reattive ai cambiamenti di mercato [88]. La recente pandemia legata al Covid-19, ha accentuato tutte queste limitazioni, portando l'attenzione a nuovi metodi e tecnologie in grado di fornire all'industria una maggiore velocità di adattamento e flessibilità.

Inoltre, i consumatori sono sempre più orientati verso la personalizzazione dei prodotti, richiedendo, però, tempi di consegna sempre più rapidi [89].

Molte aziende hanno quindi iniziato a sviluppare nuove strategie di gestione della catena di approvvigionamento per adattarsi all'esigenze del consumatore e prepararsi a possibili periodi futuri di instabilità nell'economia globale [90].

In questo contesto, molte imprese multinazionali hanno intrapreso un percorso di reshoring, riportando alcune delle loro attività e produzioni nei loro paesi d'origine [91].

Questo cambiamento di rotta può essere attribuito a diversi fattori, tra cui la ricerca di una maggiore qualità, controllo e flessibilità nelle operazioni e una crescente consapevolezza dei costi nascosti e delle sfide legate all'offshoring [88].

Il fenomeno del reshoring rappresenta un interessante sviluppo nell'ambito delle strategie aziendali internazionali, richiedendo un'analisi approfondita per comprendere appieno le dinamiche sottostanti.

## 5.2 Offshoring

Il termine "offshoring" deriva dalla combinazione dei vocaboli "offshore" e "outsourcing", e si riferisce all'esternalizzazione di processi in un paese diverso da quello in cui ha sede l'azienda, spesso a una distanza considerevole dalla sede principale [92].

L'attività di offshoring può essere motivata sia dalla volontà di presidiare maggiormente un mercato estero, sia dalla ricerca di condizioni più favorevoli per aumentare la competitività nel paese d'origine. Si può parlare di offshoring quando alcune attività legate alla produzione, alla commercializzazione e all'approvvigionamento dell'azienda superano i confini nazionali e vengono svolte in un Paese estero [86].

Contrariamente a quanto si possa pensare, tale fenomeno non riguarda solamente

le cosiddette attività manifatturiere labour-intensive. Infatti, società come Lufthansa e Philips hanno esternalizzato attività quali la contabilità e l'IT in Polonia mostrando come, negli anni, anche il fenomeno di offshoring ha subito un processo di evoluzione e si è dovuto adattare ai cambiamenti della supply chain [93].

### 5.2.1 I vantaggi

Inizialmente, l'offshoring aveva come obiettivo principale la ricerca di paesi in cui svolgere le attività aziendali a costi inferiori [85]. Questo ha spinto numerose aziende del mondo occidentale a trasferire le proprie operazioni verso paesi in via di sviluppo come la Cina e l'India [87], dove il fenomeno dell'offshoring sembrava rappresentare una significativa migrazione di posti di lavoro dai paesi sviluppati a quelli in via di sviluppo. Nel corso degli anni, tuttavia, si è verificata un'evoluzione sostanziale del panorama globale, evidenziando che l'offshoring era un fenomeno più complesso di quanto inizialmente sembrasse.

Sicuramente, la riduzione dei costi rimane il principale driver che influenza le decisioni di offshoring. Tuttavia, si sta delineando una nuova tendenza in cui le strategie di offshoring sono sempre più spesso motivate da altri fattori [94]:

- la ricerca di nuove opportunità di crescita;
- la pressione competitiva;
- la disponibilità di personale altamente qualificato.

### 5.2.2 Rischi e criticità

Sebbene si tenda sempre a concentrarsi sui possibili vantaggi derivanti dall'applicazione delle strategie di offshoring, è importante considerare attentamente anche i rischi e le criticità che comportano.

Tra i fattori che hanno spinto molte aziende a riconsiderare le proprie strategie di offshoring, le seguenti motivazioni risultano particolarmente rilevanti [91]:

- la potenziale perdita di controllo su informazioni sensibili;
- la mancanza di adeguata tutela della proprietà intellettuale;
- le sfide nell'assicurare standard qualitativi elevati.

Inoltre, non sempre le aziende hanno prestato sufficiente attenzione alla scelta della localizzazione per la produzione e all'organizzazione della catena di approvvigionamento, ma hanno semplicemente scelto il paese con il più basso costo [87].

Tutti questi fattori hanno fatto sì che la delocalizzazione internazionale non abbia sempre generato gli incrementi di profitto sperati e un vantaggio competitivo sostenibile: circa la metà delle aziende coinvolte in progetti di offshoring non ha conseguito i benefici finanziari previsti [94].

Inoltre, le dinamiche competitive, specialmente a livello internazionale, sono in costante mutamento, e le condizioni che originariamente hanno motivato le strategie di offshoring sono cambiate. Alcuni dei fattori che in passato hanno spinto le aziende a investire all'estero sono ora gli stessi che le stanno portando a rivalutare la loro struttura e adottare operazioni di reshoring [88].

### 5.3 Reshoring

Il reshoring è una strategia aziendale che si traduce in un trasferimento, parziale o totale, della produzione o delle attività precedentemente delocalizzate all'estero verso il paese d'origine dell'azienda, con l'obiettivo di servire le esigenze locali, regionali o globali [88]. È essenziale notare che il reshoring rappresenta una decisione che va in senso opposto e segue un precedente processo di offshoring.

Questa strategia non implica necessariamente il ritorno di tutte le attività nel paese d'origine; al contrario, spesso ne coinvolge solo una parte specifica. Queste attività possono essere sia interne, cioè gestite direttamente dall'azienda stessa nei propri stabilimenti nazionali, sia esterne, ovvero affidate a fornitori nazionali anziché a fornitori stranieri come avveniva in precedenza [95].

Il reshoring può essere motivato da diversi fattori, tra cui il desiderio di migliorare il controllo sulla qualità dei prodotti, ridurre i tempi di consegna, sfruttare competenze locali specializzate, proteggere la proprietà intellettuale e adeguarsi ai regolamenti ambientali. È una decisione strategica che richiede un'attenta valutazione delle implicazioni finanziarie e logistiche, ma può offrire vantaggi significativi in termini di efficienza operativa e adattamento alle mutevoli condizioni del mercato globale.

Sebbene i primi casi di questo fenomeno siano stati registrati negli anni '80 e riguardavano principalmente le attività manifatturiere, negli ultimi anni si è verificato un

repentino aumento di casistiche di reshoring coinvolgendo anche molte attività nell'ambito dei servizi [86].

Nel corpo della ricerca, sono state descritte quattro sottocategorie di reshoring, che si distinguono in base al tipo di gestione adottata per l'attività sia prima che dopo il rimpatrio: [88, 97]:

- **In-house reshoring:** quando la produzione viene spostata da una filiale estera a una struttura situata in patria e di proprietà dell'azienda stessa;
- **Reshoring for outsourcing:** l'attività precedentemente svolta in una filiale estera viene esternalizzata a un fornitore locale;
- **Reshoring for insourcing:** prevede il trasferimento di attività precedentemente affidate a fornitori esteri nelle strutture di proprietà dell'azienda in patria;
- **Outsourced reshoring:** l'attività precedentemente svolta da fornitori esteri viene esternalizzata a fornitori situati in patria.

Nei casi di "reshoring for outsourcing" e "reshoring for insourcing" la decisione di riportare l'attività in patria viene presa contemporaneamente a una decisione riguardante la gestione dei fornitori [97].

### 5.3.1 Reshoring in Italia e differenze con gli altri paesi

Come visto in precedenza, il fenomeno del reshoring è una strategia aziendale piuttosto moderna, che ha avuto il suo picco di casi solamente negli ultimi anni.

Tuttavia, grazie al database fornito da "Uni-Club MoRe Back-Reshoring" è possibile analizzare questo fenomeno e coglierne sfumature e motivazioni di applicazione [98].

In particolare, prendendo in considerazione gli anni che vanno dal 2007 al 2016, è evidente come l'Italia detenga il maggior numero di casistiche di reshoring in tutta Europa (tabella 2).

Tabella 2. Casi di Reshoring in Italia dal 2007 al 2016 [98]

Ex Paese Ospitante	Num.
Cina	41
Asia (no Cina)	15
Europa dell'Est ed ex URSS	29
Europa occidentale	27
Nord Africa e Medio Oriente	4
Nord America	4
America centrale e meridionale	1
n.a.	2
<b>Totale</b>	<b>121</b>

Le ragioni che inducono le aziende italiane a riportare la produzione in patria sono legate principalmente ai vantaggi derivanti dall'etichetta "Made in Italy", al miglioramento del servizio clienti e alla miglior qualità della produzione nel territorio italiano (tabella 3) [99]. I settori più coinvolti da questo fenomeno sono l'abbigliamento e la produzione di articoli in pelle, settori in cui il marchio "Made in Italy" ha un peso significativo a causa della rinomata qualità dei prodotti italiani in tali ambiti [98, 99]. Inoltre, è importante specificare che in Italia le iniziative di reshoring avvengono autonomamente, poiché il governo non ha adottato sussidi e incentivi che possano agevolarne l'adozione.

Tabella 3. Motivazioni di reshoring in Italia [99]

Motivazione Reshoring	Num.
Made in Italy	42
Miglioramento servizio clienti	25
Miglior qualità della produzione	18

## 5.4 Reshoring e Additive Manufacturing

Le tecnologie dell'industria 4.0 hanno un ruolo cruciale al fine di ottenere un vantaggio competitivo e, in alcuni contesti, per la sopravvivenza aziendale. Queste innovazioni tecnologiche sono associate a livelli di efficienza operativa e produttività notevolmente elevati, consentendo allo stesso tempo la personalizzazione dei prodotti e la creazione di

una catena di produzione altamente flessibile e automatizzata [100]. Un aspetto di rilievo da considerare riguarda la correlazione esistente tra l'adozione di queste tecnologie e le decisioni aziendali di riportare in patria alcune attività precedentemente delocalizzate. Malgrado la fabbricazione additiva goda di una maggiore diffusione rispetto ad altre tecnologie digitali, il suo impiego nelle operazioni di produzione è ancora in una fase iniziale [5]. Pertanto, stabilire una correlazione tra l'AM e le strategie di reshoring risulta essere un compito complesso. Tuttavia, attraverso lo studio di Fratocchi (2017) è possibile notare, in molti dei casi documentati ed analizzati nell'analisi (figura 28), una notevole sovrapposizione tra le motivazioni legate al reshoring e i benefici delle tecnologie di stampa 3D [85].

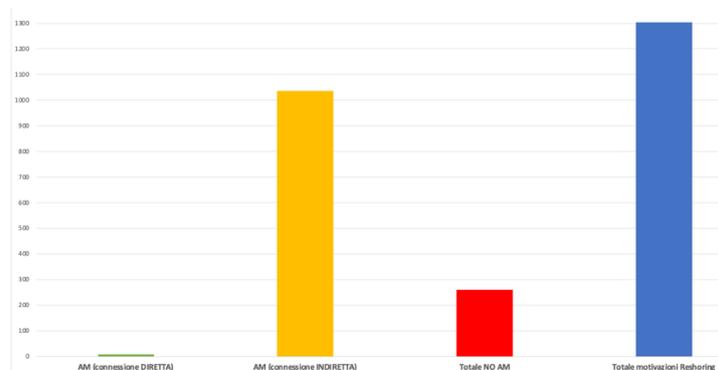


Figura 28. Connessione diretta e indiretta AM e reshoring [85]

Infatti, sebbene i dati analizzati mostrino che, solamente otto decisioni siano ricollegabili direttamente all'adozione dell'Additive Manufacturing (tabella 4), approfondendo il dataset è possibile ricavare informazioni rilevanti supplementari, confermando ancora una volta il potenziale di questa nuova tecnologia.

Tabella 4. Motivazioni legate al reshoring [85]

Motivazione Reshoring	Num.	Connessione Diretta AM	Connessione Indiretta AM
Costi logistici	136	▪	✓
"Made in effect"	124	▪	✓
Scarsa qualità dei prodotti offshored	122	▪	✓
Diminuzione delle differenze di costo del lavoro	103	▪	✓
Diminuzione del costo totale	101	▪	✓
Miglioramento del livello di servizio	97	▪	✓
Diminuzione dei tempi di consegna	82	▪	✓
Aiuti governativi	69	▪	✓
R&D vicino alla produzione	68	▪	✓
Riorganizzazione globale dell'azienda	68	▪	▪
Diminuzione dei costi di coordinamento	63	▪	✓
Dimensioni minime del lotto	40	▪	✓
Inadeguatezza HR Paese ospitante	29	▪	▪
Crisi economica globale	29	▪	▪
Flessibilità organizzativa	28	▪	✓
Incentivi Walmart (solo aziende USA)	26	▪	▪
Elementi emotivi	17	▪	▪
Disponibilità di capacità produttiva Paese d'origine	16	▪	▪
Bassa attrattività del paese ospitante	15	▪	▪
Pressione sociale Paese d'origine	15	▪	▪
Problemi IP	12	▪	▪
Obblighi di reimportazione	10	▪	▪
Nuove tecnologie di produzione	9	▪	▪
Costo dell'energia	8	▪	▪
Adozione della fabbricazione additiva	8	✓	▪
Assenza di fornitore Paese Ospitante	6	▪	▪
Sostenibilità ambientale	3	▪	✓

### 5.4.1 Correlazione tra reshoring e AM

Osservando le motivazioni che hanno spinto le aziende a riportare alcune attività nel proprio paese d'origine, diventa evidente come l'adozione della fabbricazione additiva possa effettivamente contribuire al conseguimento di tali obiettivi. In particolare, su un totale di 28 motivazioni identificate dalle aziende, ben 13 di esse possono essere collegate indirettamente ai vantaggi che, l'adozione dell'Additive Manufacturing comporterebbe (tabella 3):

- “Costi logistici”: la possibilità di ridurre/eliminare le attività di assemblaggio determina la riduzione dei costi di trasporto per i componenti;
- “Made in effect” e “Scarsa qualità dei prodotti offshored”: la possibilità di stampare direttamente nel paese d'origine permette alle aziende di beneficiare dell'effetto "made in", ovvero il maggiore valore che i clienti riconoscono quando i prodotti sono fabbricati in un determinato paese [100];
- “Diminuzione delle differenze di costo del lavoro”: la possibilità di ridurre/eliminare le attività di assemblaggio determina la riduzione delle differenze di costo del lavoro [66]
- “Diminuzione del costo totale”: la possibilità di produrre in modo economico componenti complessi, la riduzione degli scarti e le ridotte dimensioni dei lotti, consentono la diminuzione del costo totale associato alla produzione [19];
- “Miglioramento del livello di servizio” e “Diminuzione dei tempi di consegna”: la capacità di modificare il design in modo rapido permette la produzione di prodotti personalizzati, migliorando così l'esperienza del cliente [65]. In aggiunta, la localizzazione delle strutture produttive vicino ai consumatori riduce in modo significativo i tempi di consegna [66];
- “Aiuti organizzativi”: al fine di favorire l'economia locale e pratiche sostenibili di produzione, sempre più spesso gli stati offrono incentivi governativi nazionali per promuovere l'adozione delle tecnologie di fabbricazione additiva [101];
- Diminuzione dei costi di coordinamento: la scelta di effettuare il reshoring conduce a una riduzione dei costi legati al monitoraggio e al controllo, che spesso sono dovuti alla complessità delle catene globali di fornitura [66]. Inoltre, l'implementazione dell'Additive Manufacturing (AM) in modo centralizzato può

ulteriormente contribuire a ridurre questi costi grazie alla semplificazione della catena di approvvigionamento [5];

- “R&D vicino alla produzione”: la separazione geografica tra la produzione e le attività di ricerca e sviluppo ha un impatto negativo sull'innovazione. Le caratteristiche della fabbricazione additiva forniscono un notevole vantaggio nella fase di progettazione del prodotto e consentono la riconfigurazione del processo produttivo, rendendolo più efficiente e adattabile [80];
- “Dimensioni minime del lotto”: considerata l'assenza di strumenti specifici per ciascun oggetto, non è più necessario avere lotti di grandi dimensioni per poter ammortizzare i costi di produzione e di attrezzaggio [102];
- “Flessibilità organizzativa”: la fabbricazione additiva permette alle aziende di adattarsi e reagire in modo rapido ed efficiente alle mutevoli esigenze del mercato [85];
- “Sostenibilità ambientale”: l'Additive Manufacturing offre l'opportunità di ottimizzare l'uso delle risorse, ridurre gli sprechi e adattare la produzione alle esigenze specifiche dei clienti, contribuendo così a una produzione più efficiente dal punto di vista ambientale [102, 81].

Pertanto, sembra esserci una notevole convergenza tra le ragioni che spingono verso il reshoring e i vantaggi offerti dalle tecnologie di stampa 3D, in molti dei casi presi in esame. Di conseguenza, è plausibile affermare che la fabbricazione additiva possa fungere da tecnologia abilitante per il reshoring nell'ambito della produzione.

## Capitolo 6 - Conclusioni e sviluppi futuri

L'Additive Manufacturing rappresenta una tecnologia rivoluzionaria che, negli ultimi anni, ha subito un notevole progresso sia dal punto di vista tecnologico che in termini di applicazioni. Questa tecnologia sta trasformando i processi di produzione, offrendo numerosi vantaggi alle aziende che decidono di adottarla [5]. Tra questi spiccano la possibilità di creare parti integrate, la libertà di progettazione, la sostenibilità ambientale, la personalizzazione di massa e la riduzione del time-to-market, dei costi di produzione, dei costi logistici, degli stock e dei tempi di sviluppo [5, 11].

Tuttavia, è importante riconoscere che la stampa 3D porta con sé anche significativi svantaggi che ne limitano l'adozione. Come precedentemente discusso, tra questi risultano particolarmente rilevanti le restrizioni sulle dimensioni degli oggetti stampabili, i tempi di produzione prolungati rispetto ai processi tradizionali, i costi associati all'acquisto delle attrezzature di stampa e dei materiali [12], nonché l'aumento del rischio di imitazioni e della competitività all'interno del mercato [38].

Pertanto, sebbene l'Additive Manufacturing presenti innegabili vantaggi, è essenziale un'analisi accurata e critica dei suoi svantaggi e delle sfide che essa comporta prima di implementare tale tecnologia all'interno dei propri processi di produzione. Nonostante le sfide che può presentare, la stampa 3D ha dimostrato il suo valore in diversi settori, tra cui l'aerospaziale, l'automobilistico, la medicina, l'edilizia, la moda e molti altri [4]. In tutti questi ambiti, lo scopo finale è ottimizzare la gestione delle proprie Supply Chain [48] per rimanere competitivi. Per raggiungere questo obiettivo, sempre più industrie stanno integrando l'Additive Manufacturing nelle loro catene di approvvigionamento, ottenendo una notevole riduzione dei costi operativi, un incremento della produttività e una crescita dei profitti [53].

Tutti questi risultati sono stati resi possibili grazie all'evoluzione dei due più noti metodi di gestione della Supply Chain, il Lean Supply Chain e l'Agile Supply Chain, che sono stati resi più efficaci grazie all'impiego della stampa 3D [7].

Sebbene, oggi, le tecnologie additive dimostrino efficienza e vantaggi economici nella produzione di unità singole o piccoli lotti, mentre sono limitanti per i grandi volumi di produzione [76], il futuro prospetta potenziali avanzamenti tecnologici che aumenterebbero la velocità di produzione, migliorerebbero la qualità e ridurrebbero i costi associati ai prodotti additivi. Questi sviluppi potrebbero consentire alle tecnologie

additive di competere efficacemente anche in contesti di produzione su larga scala, superando le attuali limitazioni tecnologiche. Di conseguenza, sarà possibile sfruttare economie di scala in futuro e sfatare il pensiero di molti studiosi che hanno affermato l'impossibilità di vantaggi economici su grandi volumi di produzione attraverso l'adozione di questa tecnologia [74]. Lo scenario futuro esposto sta spingendo sempre più aziende ad investire nella fabbricazione additiva e nelle relative attività di ricerca e sviluppo [81].

Infine, sebbene negli ultimi decenni le imprese hanno spostato la produzione in paesi a basso costo [85], rendendo le catene di fornitura fragili e poco reattive ai cambiamenti, le crescenti richieste di prodotti personalizzati e di tempi di consegna rapidi hanno spinto alcune imprese multinazionali a tornare ai propri paesi d'origine [89]. Questo cambiamento è motivato dalla ricerca di maggiore qualità, controllo e flessibilità, insieme a una crescente consapevolezza dei costi e delle sfide legate all'offshoring [91]. In questo contesto l'Additive Manufacturing ha dimostrato di poter svolgere un ruolo chiave nel favorire il riposizionamento delle attività produttive [85].

In conclusione, nonostante gli svantaggi e le limitazioni attuali, l'AM offre un'enorme opportunità per rivoluzionare la produzione e la gestione delle catene di approvvigionamento. Tuttavia, la sua recente adozione da parte delle aziende impedisce ancora di delineare un quadro completo e dettagliato dei suoi effetti a lungo termine. Le future ricerche potranno quindi soffermarsi su casi studio di aziende che hanno implementato con successo tale tecnologia, mettendo a confronto le loro scelte strategiche con tutti quei casi in cui l'integrazione non è stata altrettanto efficace.

Inoltre, con l'ulteriore diffusione della stampa 3D, diverrà essenziale sviluppare nuove figure professionali dedicate alla gestione di questa tecnologia e alla sua integrazione nella catena di approvvigionamento. La formazione e l'acquisizione di skills per la gestione dell'Additive Manufacturing diventeranno un punto focale nelle future iniziative educative. Risulterà particolarmente rilevante capire come le istituzioni risponderanno a questa crescente domanda di nuove competenze necessarie per massimizzare i vantaggi dell'Additive Manufacturing.

## Elenco delle figure e tabelle

<i>Figura 1. Processo di fabbricazione additiva [103]</i> .....	11
<i>Figura 2. Categorizzazione di processo [15]</i> .....	12
<i>Figura 3. Binder Jetting (BJ) [17]</i> .....	13
<i>Figura 4. Direct Energy Deposition (DED) [20]</i> .....	14
<i>Figura 5. Material Extrusion (ME) [23]</i> .....	15
<i>Figura 6. Material Jetting (MJ) [26]</i> .....	16
<i>Figura 7. Powder Bed Fusion (PB) [113]</i> .....	17
<i>Figura 8. Sheet Lamination (SL) [31]</i> .....	17
<i>Figura 9. Vat Photopolymerization (VP) [113]</i> .....	18
<i>Figura 10. Settori di applicazione dell'Additive Manufacturing [41]</i> .....	21
<i>Figura 11. Effetti previsti della stampa 3D nell'industria aerospaziale entro il 2025 [43]</i> .....	22
<i>Figura 12. Macro Fasi Supply Chain [49]</i> .....	26
<i>Figura 13. Supply Chain Management (SCM) flow [54]</i> .....	27
<i>Figura 14. Le differenze tra Lean e Agile [55]</i> .....	28
<i>Figura 15. Andamento dei costi all'aumentare della Complessità/Personalizzazione [4]</i> .....	33
<i>Figura 16. Struttura centralizzata SC-AM [109]</i> .....	35
<i>Figura 17. Struttura decentralizzata SC-AM [109]</i> .....	36
<i>Figura 18. Configurazioni SC-AM al variare del tasso di decentralizzazione [108]</i> .....	37
<i>Figura 19. Struttura domestica SC-AM [109]</i> .....	38
<i>Figura 20. Order Penetration Point (OPP) [66]</i> .....	40
<i>Figura 21. Breakeven point Additive e Conventional Manufacturing [76]</i> .....	41
<i>Figura 22. Curve dei costi unitari del prodotto convenzionale e additivo [74]</i> .....	42
<i>Figura 23. Costi della catena di approvvigionamento pre/post implementazione AM [19]</i> .....	44
<i>Figura 24. Applicazione della stampa 3D [79]</i> .....	45
<i>Figura 25. Investimento in R&amp;D passato e futuro [81]</i> .....	46
<i>Figura 26. Investimento futuro in nuove tecnologie [81]</i> .....	46
<i>Figura 27. Applicazioni per Rapid Prototyping [65]</i> .....	47
<i>Figura 28. Connessione diretta e indiretta AM e reshoring [85]</i> .....	54
<i>Tabella 1. Parole chiave per la ricerca delle fonti</i> .....	6
<i>Tabella 2. Casi di Reshoring in Italia dal 2007 al 2016 [98]</i> .....	53
<i>Tabella 3. Motivazioni di reshoring in Italia [99]</i> .....	53
<i>Tabella 4. Motivazioni legate al reshoring [85]</i> .....	55

## Bibliografia e Sitografia

- [1] <https://am.pictet.it/blog/articoli/tecnologia-e-innovazione/digital-supply-chain-un-nuovo-approccio-alla-gestione-della-filiera>
- [2] <https://scaffalaturaonline.it/2019/09/27/facciamo-chiarezza-qual-e-la-differenza-tra-la-supply-chain-e-logistica/>
- [3] <https://www.smactory.com/industria4-0-definizione-e-benefici/>
- [4] Brett P. Conner, G. P. (2014). Making sense of 3-D printing: Creating a map of additive manufacturing products and services. *Sciencedirect*, 64-76.
- [5] Berman, B. (2012). 3-D printing: The new industrial revolution. *Business horizons*, 55(2), 155-162.
- [6] Savastano, M., Amendola, C., & D'Ascenzo, F. (2016). Additive manufacturing e stampa 3D: stato dell'arte e opportunità per una gestione sostenibile della supply chain. In *Supply Chain Sostenibile: Aspetti Teorici ed Evidenze Empiriche* (Vol. 2, pp. 65-78). Cedam-Wolters Kluwer.
- [7] Oettmeier, K., & Hofmann, E. (2016). Impact of additive manufacturing technology adoption on supply chain management processes and components. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 27(7), 944-968.
- [8] Prakash, K. S., Nancharaih, T., & Rao, V. S. (2018). Additive manufacturing techniques in manufacturing-an overview. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 3873-3882.
- [9] ASTM F2792-12, «Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies» (Withdrawn 2015) ASTM International, 2012.
- [10] Charles W. Hull, Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography, 1986
- [11] Simon Ford, Letizia Mortara, Tim Minshall, «The Emergence of Additive Manufacturing» 2016.

- [12] Additive vs. Subtractive manufacturing. (n.d.). Formlabs. Retrieved October 5, 2022, from <https://formlabs.com/blog/additive-manufacturing-vs-subtractive-manufacturing/>
- [13] Li, H., Wang, T., Sun, J. and Yu, Z. (2018), “The effect of process parameters in fused deposition modelling on bonding degree and mechanical properties”, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 24 No. 1, pp. 80-92.
- [14] Khajavi, S. H., Partanen, J., & Holmström, J. (2014). Additive manufacturing in the spare parts supply chain. *Computers in industry*, 65(1), 50-63.
- [15] Martinez, D. W., Espino, M. T., Cascolan, H. M., Crisostomo, J. L., & Dizon, J. R. C. (2022). A comprehensive review on the application of 3D printing in the aerospace industry. *Key engineering materials*, 913, 27-34.
- [16] <https://www.3dnatives.com/it/binder-jetting-stampa-3d-060920219/#!>
- [17] Ziaee, M., & Crane, N. B. (2019). Binder jetting: A review of process, materials, and methods. *Additive Manufacturing*, 28, 781-801.
- [18] Mostafaei, A., Elliott, A. M., Barnes, J. E., Li, F., Tan, W., Cramer, C. L., ... & Chmielus, M. (2021). Binder jet 3D printing—Process parameters, materials, properties, modeling, and challenges. *Progress in Materials Science*, 119, 100707.
- [19] <https://www.3dnatives.com/it/direct-energy-deposition-stampa-3d-100920219/>
- [20] Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., Gibson, I., Rosen, D., & Stucker, B. (2015). Directed energy deposition processes. *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing*, 245-268.
- [21] Ahn, D. G. (2021). Directed energy deposition (DED) process: State of the art. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 8, 703-742.
- [22] Vyavahare, S., Teraiya, S., Panghal, D., & Kumar, S. (2020). Fused deposition modelling: a review. *Rapid Prototyping Journal*, 26(1), 176-201.
- [23] Sathies, T., Senthil, P., & Anoop, M. S. (2020). A review on advancements in applications of fused deposition modelling process. *Rapid Prototyping Journal*, 26(4), 669-687.

- [24] <https://www.3dnatives.com/it/modellazione-deposizione-fusa-021120219/>
- [25] <https://www.3dnatives.com/it/material-jetting-polyjet-stampa-3d-110920219/>
- [26] Gülcan, O., Günaydın, K., & Tamer, A. (2021). The state of the art of material jetting—a critical review. *Polymers*, 13(16), 2829.
- [27] Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., Khorasani, M., Gibson, I., Rosen, D., ... & Khorasani, M. (2021). Material jetting. *Additive Manufacturing Technologies*, 203-235.
- [28] Sun, S., Brandt, M., & Easton, M. J. L. A. M. (2017). Powder bed fusion processes: An overview. *Laser additive manufacturing*, 55-77.
- [29] King, W. E., Anderson, A. T., Ferencz, R. M., Hodge, N. E., Kamath, C., Khairallah, S. A., & Rubenchik, A. M. (2015). Laser powder bed fusion additive manufacturing of metals; physics, computational, and materials challenges. *Applied Physics Reviews*, 2(4).
- [30] <https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/sheet-lamination/>
- [31] Pilipović, A. (2022). Sheet lamination. In *Polymers for 3D Printing* (pp. 127-136). William Andrew Publishing.
- [32] Pagac, M., Hajnys, J., Ma, Q. P., Jancar, L., Jansa, J., Stefek, P., & Mesicek, J. (2021). A review of vat photopolymerization technology: Materials, applications, challenges, and future trends of 3d printing. *Polymers*, 13(4), 598.
- [33] Al Rashid, A., Ahmed, W., Khalid, M. Y., & Koc, M. (2021). Vat photopolymerization of polymers and polymer composites: Processes and applications. *Additive Manufacturing*, 47, 102279.
- [34] Fiedor, P., Pilch, M., Szymaszek, P., Chachaj-Brekiesz, A., Galek, M., & Ortyl, J. (2020). Photochemical study of a new bimolecular photoinitiating system for vat photopolymerization 3D printing techniques under visible light. *Catalysts*, 10(3), 284.
- [35] Wohlers, T., Gornet, T., Mostow, N., Campbell, I., Diegel, O., Kowen, J., ... & Peels, J. (2016). History of additive manufacturing.

- [36] Pîrjan, A., & Petroșanu, D. M. (2013). The impact of 3D printing technology on the society and economy. *Journal of Information Systems and Operations Management*, 7(2), 360-370.
- [37] <https://www.bcg.com/publications/2017/steel-metals-mining-how-to-position-company-3d-printing-value-chain>
- [38] Wittbrodt, B. T. (2013). Life-cycle economic analysis of distributed manufacturing with open source 3D- printers. 713-726.
- [39] Steenhuis, H. J., & Pretorius, L. (2016). Consumer additive manufacturing or 3D printing adoption: an exploratory study. *Journal of Manufacturing Technology Management*.
- [40] Knofius, N. (2018). Additive Manufacturing in After-Sales Service Supply Chains.
- [41] Wohlers report 2014 : 3D printing and additive manufacturing state of the industry annual worldwide progress report
- [42] Joshi, S. C., & Sheikh, A. A. (2015). 3D printing in aerospace and its long-term sustainability. *Virtual and physical prototyping*, 10(4), 175-185.
- [43] Gebler, M., Uiterkamp, A.J.M.S., and Visser, C., 2014. A global sustainability perspective on 3D printing technologies. *Energy Policy*, 74, 158–167.
- [44] Lim, C. W. J., Le, K. Q., Lu, Q., & Wong, C. H. (2016). An overview of 3-D printing in manufacturing, aerospace, and automotive industries. *IEEE potentials*, 35(4), 18-22.
- [45] <https://www.marketresearchfuture.com/reports/3d-printing-automotive-market/toc>
- [46] <https://www.bmwgroup.com/en/news/general/2020/additive-manufacturing.html>
- [47] Wood, D. F. (2023, September 26). logistics. *Encyclopedia Britannica*. <https://www.britannica.com/money/topic/logistics-business>
- [48] Stadtler, H. (2014). Supply chain management: An overview. *Supply chain management and advanced planning: Concepts, models, software, and case studies*, 3-28.
- [49] <https://www.insidemarketing.it/glossario/definizione/supply-chain/>

[50] Christopher, M. (2005). Logistics and supply chain management, creating value-adding networks (3rd ed.). Harlow: Financial Times Prentice Hall.

[51] The Council of Supply Chain Management Professionals. (2013). Supply chain and logistics terms and glossary. [http://cscmp.org/sites/default/files/user\\_uploads/resources/downloads/glossary-2013.pdf](http://cscmp.org/sites/default/files/user_uploads/resources/downloads/glossary-2013.pdf).

[52] <https://www.industry4business.it/industria-4-0/supply-chain-manager/>

[53] Catapano, N. (2005). Supply Chain Management (SCM): le logiche di approvvigionamento ed il ruolo della reputazione.

[54] Pessotto, A. (2009). SCM: Supply Chain Management. Università degli studi di Udine, Dipartimento di Ingegneria Elettrica Gestionale e Meccanica.

[55] Christopher, M., & Towill, D. (2001). An integrated model for the design of agile supply chains. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 31(4), 235-246.

[56] Naylor, J.B., Naim, M.M. and Berry, D. (1999), 'Leagility: interfacing the lean and agile manufacturing paradigm in the total supply chain', *International Journal of Production Economics*, Vol. 62, pp. 107-18.

[57] Anand, G., & Kodali, R. (2008). A conceptual framework for lean supply chain and its implementation. *International Journal of Value Chain Management*, 2(3), 313-357.

[58] Vokurka, R.J. and Lummus, R.R. (2000) 'The role of just-in-time in supply chain management', *Int. J. Logistics Management*, Vol. 11, pp.89-98.

[59] Rother, M. and Shook, J. (1999) *Learning to See: Value Stream Mapping to Add Value and Eliminate Muda*, Lean Enterprise Institute, Brookline, Massachusetts.

[60] Christopher, M., Harrison, A., & van Hoek, R. (2016). Creating the agile supply chain: issues and challenges. *Developments in Logistics and Supply Chain Management: Past, Present and Future*, 61-68.

[61] Christopher, M. (1999) "The agile supply chain and how to create it", *Supply Chain Excellence Newsletter*, Hay Market Publications, March.

- [62] C. Tuck, R. J. M. Hague, N. D. Burns., «Rapid Manufacturing - impact in supply chain methodologies and practice,» *International Journal of Services and Operations Management*, 2007.
- [63] Pine, B. J. (1993) *Mass Customisation*, Harvard Business School Press, Boston.  
Priess, C., Goldman, S. L. and Nagel. A. (1996) *Co-operate to Compete*, van Nostrand Reinhold, New York.
- [64] Bak, D. (2003). Rapid prototyping or rapid production? 3D printing processes move industry towards the latter. *Assembly Automation*, 23(4), 340-345
- [65] Wohlers, T. (2004). Past, present and future of rapid prototyping. *International Journal of Product Development*, 1(2), 147-154.
- [66] Verboeket, V., Krikke, H., (2019). The disruptive impact of additive manufacturing on supply chains: A literature study, conceptual framework and research agenda, *Computers in Industry*, 111, 91-107.
- [67] Gallinaro, S. (2021), “Catene di fornitura basate sulla produzione additiva”, *Electronic Journal of Management*, 1824-3576 (Article in press).
- [68] Bessant, J., 1994. Towards total integrated manufacturing. *International Journal of Production Economics* 34 (3), 237 – 251
- [69] Stephen Mellor, Liang Hao, David Zhang, «Additive manufacturing: A framework for implementation, » *International Journal of Production Economics*, 2014.
- [70] Zairi, M., 1998. Supplier partnerships for effective advanced manufacturing technology implementation: a proposed model. *Integrated Manufacturing Systems* 9 (2), 109 – 119
- [71] Olhager, J. (2003). Strategic positioning of the order penetration point, *International Journal of Production Economics*, 85(3), 319–329.
- [72] Koberg, E., & Longoni, A. (2019). A systematic review of sustainable supply chain management in global supply chains. *Journal of cleaner production*, 207, 1084-1098.

[73] Yang, B., Burns, N.D., Backhouse, C.J. (2004). Postponement: a review and an integrated framework, *International Journal of Operations & Production Management*, 24(5), 468–487.

[74] Gallinaro, S. (2019). Dai modelli lineari di business alla piattaforma di progettazione e manifattura. Gli effetti delle tecnologie additive sulla logica di creazione del valore delle imprese manifatturiere, *ImpresaProgetto – Electronic Journal of Management*, (2).

[75] Holmström, J., Liotta, G., Chaudhuri, A., (2017). Sustainability outcomes through direct digital manufacturing-based operational practices: a design theory approach. *Journal of Cleaner Production*, 167, 951–961.

[76] Cotteleer, M., Joyce, J. (2014), 3D Opportunity: additive manufacturing paths to performance, innovation, and growth, *Deloitte Review*, Issue 4.

[77] Ruffo, M., Tuck, C., Hague, R. (2006). Cost estimation for rapid manufacturing-laser sintering production, for low to medium volumes. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B, Journal of Engineering Manufacture*, 220 (9), 1417–1427.

[78] <https://www.roboze.com/en/resources/how-3d-printing-will-drive-the-supply-chain.html>

[79] González-Henríquez, C. M., Sarabia-Vallejos, M. A., & Rodríguez-Hernández, J. (2019). Polymers for additive manufacturing and 4D-printing: Materials, methodologies, and biomedical applications. *Progress in Polymer Science*, 94, 57-116.

[80] Campbell, T. A., & Ivanova, O. S. (2013). Additive manufacturing as a disruptive technology: Implications of three-dimensional printing. *Technology & Innovation*, 15(1), 67-79.

[81] <https://facfox.com/news/very-metal-kpmg-provide-insights-into-3d-printing-metal-market/>

[82] Rayna, T., & Striukova, L. (2016). From rapid prototyping to home fabrication: How 3D printing is changing business model innovation. *Technological Forecasting and Social Change*, 102, 214-224.

[83] Zonder, L., Sella, N., 2013. Precision prototyping: the role of 3D printed molds in the injection molding industry. White Paper 9-13, Stratasys, Eden Prairie, MN 55344, USA.

[84] Jiang, H., & Yang, J. (2007, March). Information technology support system of supply chain management. In proceedings of the 11th WSEAS international conference on applied mathematics, Dallas, Texas, USA (pp. 138-142).

[85] Luciano Fratocchi, «Is 3D Printing an Enabling Technology for Manufacturing Reshoring?» Reshoring of Manufacturing, 2017.

[86] Peeters, C. (2007). Offshoring to create value and compete for global talent. Expertise from Solvay Business School, 7-12.

[87] <https://hbr.org/2005/12/getting-offshoring-right>

[88] Gray, J. V., Skowronski, K., Esenduran, G., & Johnny Rungtusanatham, M. (2013). The reshoring phenomenon: what supply chain academics ought to know and should do. *Journal of Supply Chain Management*, 49(2), 27-33.

[89] Zanardini, M., Bacchetti, A., Ashour Pour, M., & Zanoni, S. (2015). Benefits and costs of additive manufacturing applications: An evaluation guideline. In *Proceedings XX Summer School “Francesco Turco”* (pp. 251-256).

[90] <https://www.ilprogettistaindustriale.it/hp-3d-printing-trend-e-previsioni-del-settore-per-il-2022/>

[91] Albertoni, F., Elia, S., Fratocchi, L., & Piscitello, L. (2015). Returning from offshore: what do we know?. *AIB INSIGHTS*, 15(4), 9-12.

[92] Oshri, I., Kotlarsky, J., Rottman, J. W., & Willcocks, L. L. (2009). Global sourcing: recent trends and issues. *Information Technology & People*, 22(3), 192-200.

[93] Willcocks, L.P. and Lacity, M. (2009), *The Practice of Outsourcing: From ITO to BPO and Offshoring*, Palgrave Macmillan, London (forthcoming).

[94] Lewin, A. Y., & Peeters, C. (2006). Offshoring work: business hype or the onset of fundamental transformation?. *Long range planning*, 39(3), 221-239.

[95] Fratocchi L., Di Mauro C. Barbieri P., Nassimbeni G., Zanon A., «When manufacturing moves back: concepts and questions,» *Journal of Purchasing and Supply Management*, Vol. 20 No. 1, pp. 54-59., 2014.

[96] Fratocchi, L., Barbieri, P., Di Mauro, C., Nassimbeni, G., Vignoli, M., 2013. Manufacturing back-reshoring – an exploratory approach for hypotheses development. Paper Presented at the XXIV Riunione Scientifica Annuale AiIG. Milan, Italy, 17 – 18 October.

[97] Wan, L., Orzes, G., Sartor, M., Di Mauro, C., & Nassimbeni, G. (2019). Entry modes in reshoring strategies: An empirical analysis. *Journal of Purchasing and Supply Management*, 25(3), 100522.

[98] <https://reshoring.eurofound.europa.eu/research-team>

[99] Ricciardi, A., Pastore, P., Russo, A., & Tommaso, S. (2015). Strategie di back-reshoring in Italia: vantaggi competitivi per le aziende, opportunità di sviluppo per il Paese. In *Strategie di back-reshoring in Italia: vantaggi competitivi per le aziende, opportunità di sviluppo per il Paese-IPE Working Paper* (Vol. 5, pp. 1-61).

[100] <https://www.smactory.com/industria4-0-definizione-e-benefici/>

[101] Gress, D. R., & Kalafsky, R. V. (2015). Geographies of production in 3D: Theoretical and research implications stemming from additive manufacturing. *Geoforum*, 60, 43-52.

[102] Simon Ford, Mélanie Despeisse, «Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges,» *Journal of Cleaner Production*, 2016.

[103] KHORRAM NIAKI, M., & Nonino, F. (2015). The impact of additive manufacturing on firms' competitiveness: an empirical investigation. In *Production Engineering and Management* (Vol. 11, pp. 195-206). Department of Production Engineering and Management.

[104] Cánez, L. E., Platts, K. W., & Probert, D. R. (2000). Developing a framework for make-or-buy decisions. *International Journal of Operations & Production Management*, 20(11), 1313-1330.

[105] Ford, D., & Farmer, D. (1986). Make or buy—a key strategic issue. *Long Range Planning*, 19(5), 54-62.

[106] Kremic, T., Icmeli Tukel, O., & Rom, W. O. (2006). Outsourcing decision support: a survey of benefits, risks, and decision factors. *Supply Chain Management: an international journal*, 11(6), 467-482.

[107] <https://www.lojack.it/blog/blog/2023/03/logistica-e-gestione-della-supply-chain-come-incidono-nel-business-aziendale/>

[108] Cantini, A., Peron, M., De Carlo, F., & Sgarbossa, F. (2022). A decision support system for configuring spare parts supply chains considering different manufacturing technologies. *International Journal of Production Research*, 1-21.

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

[110] [https://www.logimaster.it/sites/default/files/logimasternews/logimaster\\_news\\_n18.pdf](https://www.logimaster.it/sites/default/files/logimasternews/logimaster_news_n18.pdf)

[111] <https://www.weclapp.it/glossario/logistica-distributiva/>

[112] <https://www.mecalux.it/blog/sistema-informativo-logistico>

[113] <https://top3dshop.com/blog/additive-manufacture-technologies-and-types-of-3d-printers>