

**POLITECNICO DI TORINO**

**Corso di Laurea Magistrale  
in Ingegneria Gestionale**

**Tesi di Laurea Magistrale**

**SUPPLY CHAIN, RESHORING e  
SOSTENIBILITÀ: L'IMPATTO  
DELL'ADDITIVE MANUFACTURING**



**Relatore**

Prof.ssa Flaviana Calignano

**Candidato**

Lorenza Longobucco

**Correlatore**

Prof. Luca Iuliano

a.a. 2019-2020

# Indice

Abstract.....	1
Capitolo 1 – Introduzione .....	2
1.1 Supply Chain tradizionale .....	2
1.2 Nuovi contesti di mercato e sfide della Supply Chain.....	3
1.2.1 Lean Supply Chain .....	4
1.2.2 Agile Supply Chain .....	5
1.3 Dalla Supply Chain alla Demand Chain.....	5
1.4 Offshoring.....	6
1.5 Reshoring.....	7
1.5.1 I principali drivers .....	8
1.5.2 Il ruolo del governo .....	12
Capitolo 2 – Additive Manufacturing: le tecnologie .....	13
2.1 Il processo.....	13
2.2 Tecniche di fabbricazione additiva.....	18
2.2.1 Binder jetting .....	18
2.2.2 Directed energy deposition.....	20
2.2.3 Material extrusion.....	21
2.2.4 Material jetting .....	23
2.2.5 Powder bed fusion .....	24
2.2.6 Sheet lamination .....	26

2.2.7 Vat photopolymerization .....	27
Capitolo 3 – I benefici, limiti e standard .....	30
3.1 Benefici dell’AM.....	30
3.2 Motivazioni economiche .....	31
3.3 Limiti dell’AM .....	34
3.4 Standard dell’AM .....	35
Capitolo 4 – I principali settori.....	41
4.1 Aerospaziale .....	41
4.2 Automobilistico .....	44
4.3 Medico .....	46
4.5 Alimentare .....	48
4.6 Arte .....	50
4.7 Moda.....	52
4.8 Gioielleria .....	54
4.9 Edilizia e architettura.....	55
Capitolo 5 – Impatto sulla Supply Chain.....	57
5.1 Semplificazione della Supply Chain.....	57
5.2 Come introdurre l’AM all’interno della Supply Chain .....	59
5.3 Outsourcing e produzione utente.....	61
5.4 Cambiamenti organizzativi.....	64
5.5 Caso di studio: l’AM nella Supply Chain dei pezzi di ricambio .....	65
Capitolo 6 – Influenza sulle strategie di reshoring .....	70
6.1 Variazioni del modello di governance.....	74
6.2 Caso di studio: Adidas e la Speed Factory .....	75
6.3 Caso di studio: Thinklabs .....	76
6.4 Caso di studio: OtterBox .....	77

Capitolo 7 – Impatto sulla sostenibilità .....	79
7.1 Analisi delle fasi del ciclo di vita del prodotto e del materiale .....	79
7.1.1 Riprogettazione del prodotto .....	79
7.1.2 Riprogettazione del processo .....	80
7.1.3 Lavorazione delle materie prime .....	81
7.1.4 Processo di produzione .....	82
7.1.5 Riparazione dei componenti .....	82
7.1.6 Chiusura del ciclo .....	83
7.2 Consumo energetico .....	84
7.3 Sostenibilità sociale .....	85
Capitolo 8 – Conclusioni .....	87
8.1 Limitazioni della ricerca e spunti futuri .....	88
Bibliografia.....	90

## Indice delle figure

Figura 1: Motivazioni del reshoring [5] .....	9
Figura 2: Settori maggiormente interessati dal reshoring nel mondo [9] .....	11
Figura 3: Settori maggiormente interessati dal reshoring in Italia [9].....	11
Figura 4: Un esempio di conversione del modello CAD 3D in formato STL [16] .....	14
Figura 5: Orientamento oggetto [17] .....	15
Figura 6: Creazione supporti [17].....	15
Figura 7: Effetto staircase [20] .....	16
Figura 8: Un esempio di slicing interno ed esterno [20] .....	16
Figura 9: Differenza tra slicing costante e adattivo [21] .....	17
Figura 10: Binder jetting schema [28] .....	19
Figura 11: Directed energy deposition schema [36].....	20
Figura 12: Material extrusion schema [43].....	22
Figura 13: Material jetting schema [46] .....	23
Figura 14: Powder bed fusion schema [51] .....	25
Figura 15: Sistema LOM schema [54] .....	27
Figura 16: Vat photopolymerization schema [59] .....	28
Figura 17: Protesi realizzati tramite fabbricazione additiva [62] .....	31
Figura 18: Andamento della funzione di costo in relazione alle unità prodotte [65] .....	32
Figura 19: Andamento della funzione di costo in relazione alla complessità geometrica [65] .....	33
Figura 20: Struttura gerarchica concordata da ASTM e ISO per lo sviluppo futuro di standard per la produzione additiva [81].....	39
Figura 21: Staffa guida d'onda per la missione Juno [82] .....	43
Figura 22: Modello di auto XEV [92] .....	46
Figura 23: Design digitale della protesi personalizzata [95] .....	47
Figura 24: Esempi di formati di pasta Barilla realizzati tramite stampa 3D [102].....	49
Figura 25: Ricostruzione 3D della Statua di Zeus ad Olimpia [111] .....	51

Figura 26: Scultura di Michael Winstone [113] .....	51
Figura 27: Scultura di Bathsheba [114].....	52
Figura 28: Scultura di Joshua Harker [115].....	52
Figura 29: Abito realizzato da Zac Posen [118] .....	53
Figura 30: AM centralizzato [134] .....	60
Figura 31: AM distribuito [134] .....	61
Figura 32: Esempi di riconfigurazione della Supply Chain [138].....	62
Figura 33: Processo produttivo di apparecchi acustici prima e dopo l'introduzione dell'AM [141].....	64
Figura 34: Rappresentazione scenari .....	67
Figura 35: Fasi del ciclo di vita del prodotto e del materiale [157].....	79
Figura 36: Schema processo di rigenerazione di un prodotto [164] .....	84

## Indice delle Tabelle

Tabella 1: Confronto tra AM centralizzato e distribuito con tecnologie presenti .....	68
Tabella 2: Confronto tra AM centralizzato e distribuito con tecnologie future .....	69
Tabella 3: Motivazioni reshoring .....	71

---

# Abstract

La domanda dei clienti sempre più personalizzata ha spinto le aziende ad apportare diversi cambiamenti per mantenere un vantaggio competitivo sul mercato: il passaggio da una produzione di massa a una “mass-customization”, una catena di fornitura più snella e in alcuni casi la riallocazione delle attività nei Paesi d’origine. L’alto livello di personalizzazione richiesto ha dunque posto le basi per l’utilizzo delle tecnologie dell’industria 4.0 tra cui la Fabbricazione Additiva (FA). Negli ultimi anni, infatti, le tecnologie dell’Additive Manufacturing stanno assumendo un ruolo di maggiore interesse e rilievo in diversi settori: se inizialmente erano adottate solo nella fase di prototipazione, ad oggi sono state introdotte anche nella fase di produzione vera e propria. L’obiettivo di questo elaborato è analizzare in primo luogo l’impatto dell’integrazione della FA all’interno della Supply Chain, la correlazione con il fenomeno del reshoring e il suo effetto sulla sostenibilità ambientale. La tesi dimostra che l’implementazione delle tecnologie di FA semplifica la catena di fornitura e riduce sensibilmente i costi legati al trasporto e al magazzino. Inoltre, consente di diminuire in modo considerevole la produzione di scarti. Tuttavia, l’elevato prezzo dei macchinari e la scarsa conoscenza attuale ne impediscono la larga diffusione.

---

# Capitolo 1 – Introduzione

## 1.1 Supply Chain tradizionale

Per Supply Chain, letteralmente catena di approvvigionamento, si intende un processo integrato in cui varie entità quali fornitori, produttori, distributori e rivenditori, lavorano insieme con lo scopo di fornire un prodotto finito ai consumatori. Il raggiungimento di questo obiettivo richiede diverse attività tra cui l'acquisto delle materie prime, la trasformazione di queste in prodotti finiti e la consegna ai rivenditori [1].

Molto spesso il concetto di Supply Chain è confuso con quello di logista, tuttavia non sono la stessa cosa. Secondo la definizione del *Council of Logistics Management* la logistica è, infatti: “il processo di pianificazione, implementazione e controllo efficiente ed efficace del flusso e dello stoccaggio di materie prime, semilavorati e prodotti finiti e delle relative informazioni dal punto di origine al punto di consumo con lo scopo di soddisfare le esigenze dei clienti” [2]. Come si evince dalla suddetta definizione, la logistica si occupa dello spostamento e dell'immagazzinamento di materiali, semilavorati e prodotti finiti ed è quindi solo una parte della catena di approvvigionamento, che riguarda, al contrario, tutte le attività del prodotto.

All'interno della Supply Chain è possibile distinguere tre fasi principali scomponibili a loro volta in processi minori [3]:

- Approvvigionamento: è l'insieme di attività che riguardano la richiesta di materie prime necessarie per la produzione. Alcune di queste sono la gestione degli stock e la previsione della domanda.
- Produzione: comprende tutti i processi di fabbricazione vera e propria, attraverso i quali le materie prime vengono trasformate nel prodotto finito. Le sotto attività di

---

questa fase sono diverse tra cui lo sviluppo prodotto e la schedulazione della produzione.

- **Distribuzione:** si riferisce all'insieme di operazioni che hanno come obiettivo la consegna del bene finale al consumatore.

La maggior parte delle Supply Chain che operano su ampia scala sono definite Supply Network in quanto danno vita ad una rete di partner; ogni stadio, infatti, è composto da più attori. Se si considera, ad esempio, un'azienda che assembla parti per generare un prodotto finito, probabilmente ordinerà i componenti da diversi fornitori, e a sua volta consegnerà il prodotto a vari distributori. A loro volta i fornitori si affideranno a più fornitori di materie prime. Si può notare, quindi, come la complessità di un prodotto e il suo volume di vendita influiscano sulla struttura di una Supply Chain, che per diversi motivi richiede la collaborazione di molteplici attori per ogni livello [4].

## **1.2 Nuovi contesti di mercato e sfide della Supply Chain**

Uno dei requisiti chiave su cui si fondano i nuovi modelli di business è rappresentato dal concetto che siano le Supply Chain a competere, e non le singole imprese [5]; il successo sul mercato della catena di fornitura è determinato in ultima istanza dal cliente finale. La capacità di offrire il giusto prodotto, al giusto prezzo e al momento giusto non costituisce solo una fonte di un vantaggio competitivo, ma rappresenta la chiave per la sopravvivenza. La comprensione dei bisogni del mercato e la soddisfazione del cliente divengono quindi elementi cruciali per sviluppare una strategia di Supply Chain.

L'obiettivo principale del miglioramento delle performance della catena di approvvigionamento consiste, infatti, nel riallineare l'offerta con la domanda cercando contemporaneamente di contenere i costi e di migliorare la soddisfazione del cliente [6].

Le organizzazioni, dunque, sono chiamate a modificare la propria catena di approvvigionamento, applicando ad esempio i paradigmi *lean* e *agile*, per sopravvivere nel mercato. In riferimento a questi, è intuitivo comprendere che la snellezza è importante quando il fattore competitivo è il costo mentre l'agilità è essenziale quando la competizione tra le aziende si basa sul livello di servizio fornito al cliente.

---

## 1.2.1 Lean Supply Chain

Un approccio snello alla produzione e alla gestione dei processi si focalizza essenzialmente sulla riduzione degli sprechi, noti anche come “waste” [7]. Tale filosofia *lean* ha origini nell’ambiente automobilistico giapponese degli anni Settanta, in un contesto industriale incentrato sulla realizzazione di prodotti essenzialmente standard con l’obiettivo di conseguire l’efficienza nell’uso delle risorse e lo sfruttamento delle economie di scala. La prima ad implementare questo sistema fu Toyota con lo sviluppo del Toyota Production System (TPS). Ohno, ideatore del paradigma, sostiene che il successo di un’impresa dipende soprattutto dalla capacità di eliminare gli sprechi. L’ingegnere giapponese individua sette fonti principali di spreco [8] :

1. difetti di produzione;
2. sovrapproduzione;
3. scorte;
4. processi inutili e troppo costosi;
5. movimenti non necessario del personale;
6. movimenti non necessari delle merci;
7. tempi di attesa.

I principi della *lean production* sono stati successivamente approfonditi e codificati in cinque pilastri [9]:

1. identificazione del valore per il cliente;
2. identificazione del flusso del valore ed eliminazione dei processi che non generano valore;
3. creazione del flusso delle attività che generano valore in modo che scorrano senza interruzioni;
4. fare in modo che il flusso di valore sia creato dal cliente;
5. inseguimento della perfezione tramite il miglioramento continuo.

In base ai principi appena descritti, una *Lean Supply Chain* è, quindi, un insieme di organizzazioni, direttamente collegate da flussi di prodotti fisici e di informazioni, che lavorano in modo collaborativo, secondo una gestione Pull efficiente ed efficace, per ridurre

---

costi e sprechi sempre con lo scopo di soddisfare le esigenze dei clienti. Il flusso deve seguire il principio Just In Time (JIT), secondo il quale le materie prime, i semi-lavorati o i prodotti finiti devono essere immediatamente disponibili nel momento in cui vengono richiesti.

Tuttavia, il paradigma *lean* può essere applicato solo in determinati mercati, nei quali i prodotti hanno un lungo ciclo di vita e le strategie competitive si basano principalmente sul raggiungimento dell'efficienza in termini di costi piuttosto che sulla differenziazione [10]. È applicabile, infatti, in contesti in cui la domanda è relativamente stabile e prevedibile e la varietà dei prodotti è contenuta.

### **1.2.2 Agile Supply Chain**

In mercati più instabili, in cui le aziende devono continuamente introdurre nuovi prodotti per soddisfare le esigenze dei clienti è necessario adottare un approccio *agile*.

Il paradigma è definito come “la capacità di rispondere rapidamente a cambiamenti repentini nel mercato di riferimento a monte o a valle, e di gestire in modo efficace eventuali discontinuità dell'ambiente esterno” [11]. Un'Agile *Supply Chain* è, infatti, *market sensitive*, ovvero, ha la capacità di comprendere e rispondere alla domanda effettiva del mercato [12].

I principi base sono l'approvvigionamento rapido e la realizzazione posticipata. Le aziende possono compiere diverse azioni per realizzare i suddetti principi come, ad esempio, la compressione del lead-time e la riduzione degli sprechi [6]. Tuttavia, per consentire l'agilità della Supply Chain è fondamentale la collaborazione tra le aziende. È importante, infatti, l'integrazione dei processi che significa lavoro collaborativo tra fornitori e acquirenti, sviluppo congiunto di prodotti e informazioni condivise [12].

### **1.3 Dalla Supply Chain alla Demand Chain**

Mercati turbolenti e una domanda dei clienti sempre più personalizzata, spinge le aziende non solo ad attuare approcci *lean* e *agile*, come descritto in precedenza, ma a modificare completamente la propria Supply Chain, riprogettando la catena di fornitura partendo dal cliente invece che dalla fabbrica. Questo cambiamento fondamentale è reso possibile dalle

---

nuove tecnologie e in particolare dalla fabbricazione additiva, la quale spinge lo spostamento di potere costantemente a valle, da produttori e rivenditori verso acquirenti e consumatori.

La sua introduzione sta, infatti, modificando il panorama della Supply Chain, consentendo alle piccole produzioni di diventare norma e trasformando le economie di scala in economie di scopo. In sostanza, se in passato le catene di approvvigionamento erano progettate per la produzione di grandi volumi e l'ottimizzazione dei costi, le cosiddette "catene di domanda" sono orientate alla personalizzazione di massa [13].

## 1.4 Offshoring

Negli ultimi decenni, l'*offshore insourcing* e l'*outsourcing* nei Paesi in via di sviluppo sono state due delle strategie più diffuse tra le imprese che miravano a creare e mantenere un vantaggio competitivo sostenibile [14]. Nella maggior parte dei casi le aziende hanno dislocato le attività ad alta intensità di lavoro per specializzarsi in attività ad alta intensità di capitale. Inoltre, l'*offshoring* è stato attuato specialmente per produzioni standardizzate, caratterizzate da processi altamente codificati e facilmente replicabili nei Paesi *low cost*, ovvero, per tutte le attività della catena del valore a più basso valore aggiunto. Le ragioni per cui aziende appartenenti ad economie avanzate hanno delocalizzato la produzione in Paesi emergenti sono diverse, di seguito è presentata una sintesi.

1. Ragioni di costo, e in particolare, costi di manodopera inferiori.
2. Accesso a nuovi mercati: in questo caso l'*offshoring* è da considerare nell'ottica di espansione della produzione, piuttosto che dello spostamento nel luogo più conveniente.
3. Accesso a nuovi canali distributivi e alle materie prime locali.
4. Possibilità di godere di sussidi e incentivi fiscali.

Tuttavia, se inizialmente le aziende hanno considerato solo i numerosi vantaggi di questa strategia, in un secondo momento sono emersi i costi e i rischi che ne derivano. Tra questi sono presenti ostacoli burocratici, la perdita del *know-how* aziendale, la mancanza di personale qualificato per la gestione della produzione e gli inevitabili costi di localizzazione derivanti dallo spostamento del sito produttivo. Inoltre, le grandi distanze e il possibile comportamento opportunistico del sito di produzione o del fornitore estero hanno reso molto

---

difficile negoziare, monitorare e applicare le attività di fornitura e di organizzazione; generando, così, un aumento dei costi di transazione e di coordinamento [15].

Nonostante in molti casi si sia realizzata la riduzione dei costi, l'internazionalizzazione ha avuto molte conseguenze impreviste. La sua adozione, infatti, ha portato alla gestione di Supply Chain sempre più complesse che hanno perso la reattività e la flessibilità necessarie a reagire ai requisiti in rapida evoluzione dei clienti e alle interruzioni impreviste. L'aumento dei tempi di consegna, ad esempio, ha comportato il peggioramento del livello di servizio che in alcuni casi ha causato la perdita di consumatori. In aggiunta, sono stati rilevati diversi problemi per quanto riguarda la qualità dei prodotti e la flessibilità dei processi produttivi. Questi aspetti, definiti anche come costi "nascosti", hanno provocato l'aumento dei costi totali di produzione [16].

Pertanto, le difficoltà riscontrate nell'implementazione dell'*offshoring* hanno portato a riconsiderare un approccio di produzione locale.

## 1.5 Reshoring

Il *reshoring* o *back-shoring* è generalmente definito come "il trasferimento della produzione nel Paese della società madre" [17]. Tuttavia, essendo un concetto relativamente nuovo, ad oggi in letteratura non esiste una definizione unica. La prima è stata proposta da Holz nel 2009: "la delocalizzazione geografica di un'operazione funzionale e di creazione di valore da una sede all'estero verso il Paese di origine dell'azienda" [18]. Una definizione esaustiva del fenomeno è data da Frattocchi et al. che lo indica come "una strategia aziendale volontaria per quanto riguarda il trasferimento parziale o totale della produzione (interna o esterna) nel Paese d'origine per servire le esigenze locali, regionali o globali" [19]. È importante sottolineare che la strategia di *reshoring* è una decisione inversa e successiva a un precedente processo di esternalizzazione. Inoltre, come evidenziato dalla definizione di Frattocchi et al., il rimpatrio non deve necessariamente interessare tutte le attività, ma, in molti casi solo una ristretta gamma ne è soggetta. Le attività interessate possono essere sia interne che esterne: un'azienda, ad esempio, può decidere di svolgere all'interno dei propri stabilimenti nazionali o assegnare a un fornitore nazionale alcuni processi che precedentemente erano affidati a fornitori esteri.

---

## 1.5.1 I principali drivers

A differenza dell'*offshoring*, per il quale è stato immediato individuare le principali motivazioni (tra cui la riduzione dei costi è identificata come la più importante), i drivers che spingono le aziende ad implementare una strategia di *reshoring* non sempre sono allineati. Le motivazioni, infatti, possono variare in base all'obiettivo che ogni azienda si pone. In Figura 1 sono state individuate le principali ragioni considerando due aspetti: (1) l'obiettivo aziendale e (2) il livello di analisi.

1. Per quanto riguarda il primo, le aziende, per ottenere un vantaggio competitivo, possono decidere di mantenere alto il valore percepito dal cliente o di perseguire l'efficienza dei costi.

Il primo obiettivo è strettamente correlato alla qualità percepita dai consumatori e all'innovazione dei processi e dei prodotti; di conseguenza è necessario attuare una strategia di *reshoring* nel momento in cui la delocalizzazione ha ostacolato l'azienda nello sviluppo o mantenimento di capacità distintive e nella comprensione e soddisfacimento delle esigenze dei clienti.

L'efficienza dei costi, al contrario, comporta l'implementazione di strategie che mirano alla riduzione dei costi di produzione e di logistica e all'efficienza delle attività di coordinamento e controllo. Pertanto, secondo la teoria del commercio internazionale e la teoria dell'internalizzazione, il *reshoring* è attuato a causa dei costi nascosti di produzione e dei costi di gestione della logistica globale dovuti all'*offshoring*.

1. A livello di analisi le ragioni per cui l'azienda decide di attuare questa strategia sono legate a fattori interni ed esterni all'azienda.

Le motivazioni ambientali interne evidenziano la rilevanza di fattori specifici aziendali nella decisione di *reshoring*.

Le motivazioni ambientali esterne, invece, sottolineano l'importanza dei fattori specifici del Paese di origine e di quello ospitante nella scelta.

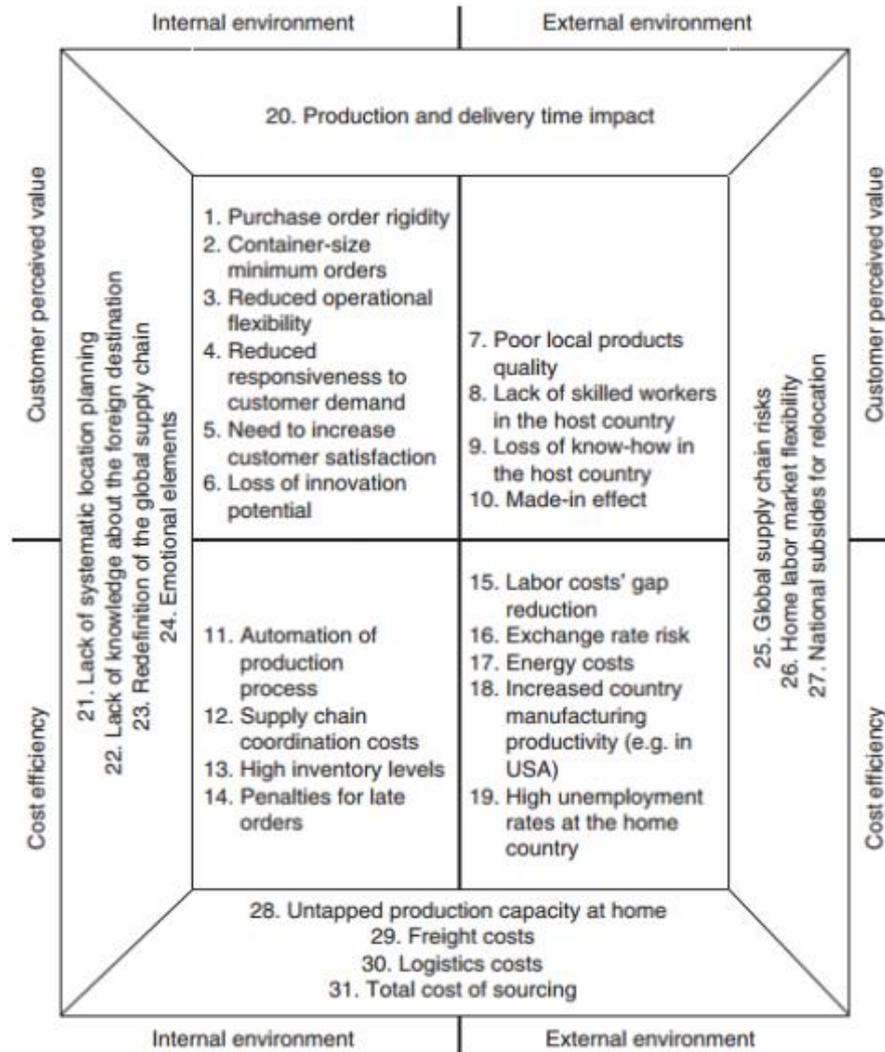


Figura 1: Motivazioni del reshoring [18]

Il primo quadrante indica le motivazioni che spingono le imprese ad attuare la strategia di *reshoring* condizionate dalla volontà di mantenere alto il valore percepito dal cliente e da fattori interni all'azienda. Tra queste una delle più importanti è la necessità di avere Supply Chain più flessibili. La personalizzazione dei prodotti per soddisfare le esigenze dei clienti, infatti, può essere raggiunta solo attraverso reti di fornitura più snelle e alla vicinanza con i consumatori. Inoltre, l'eccessivo distacco tra l'attività di ricerca e sviluppo e gli stabilimenti produttivi può avere un impatto negativo sui processi di innovazione, progettazione e miglioramento continuo; reti di fornitura complesse rendono difatto le imprese meno reattive ai cambiamenti del settore [18] [16].

---

Il secondo quadrante include le ragioni legate al raggiungimento dell'efficienza dei costi e ai fattori ambientali interni. Come detto in precedenza, il principale driver dell'*offshoring* è stato la riduzione dei costi totali di produzione; tuttavia, se da un lato la delocalizzazione ha consentito un risparmio sul costo della manodopera, dall'altro ha causato l'aumento dei costi di coordinamento, controllo e mantenimento del magazzino nonché un ritardo sui tempi di consegna. Ad oggi, infatti, la strategia migliore per ottenere l'efficienza è l'automazione dei processi produttivi rispetto al risparmio sui costi del personale [18].

Le motivazioni spinte dal mantenimento di un alto valore percepito dai clienti e da fattori esterni all'azienda sono indicate nel terzo quadrante. Queste riflettono le difficoltà nel raggiungere elevati standard di qualità nei Paesi in via di sviluppo per via, ad esempio, dell'assenza di personale specializzato o dell'inadeguatezza delle tecnologie [18]. Inoltre, ad economie meno sviluppate possono corrispondere livelli inferiori di protezione della proprietà intellettuale a causa di sistemi legali meno avanzati. Un altro aspetto importante è l'effetto "made in": specialmente in alcuni settori (abbigliamento, automobilistico, alimentare) il luogo in cui il prodotto è realizzato incide sulla percezione che i consumatori hanno dello stesso; per questo ragione, le aziende che attuano una strategia di diversificazione hanno ritrasferito i processi ad alto valore aggiunto nei Paesi d'origine.

Infine, il quarto quadrante rappresenta le ragioni del *reshoring* legate a fattori esterni alle aziende orientate all'efficienza. L'aumento di alcune componenti di costo nei Paesi emergenti ha portato a una rivalutazione della decisione dell'*offshoring* [18]. Facendo un paragone tra la Cina e gli Stati Uniti è possibile notare una riduzione dei differenziali di costo; nello specifico, se da un lato il costo dell'energia è continuato ad aumentare nel Paese orientale a causa della carenza di forniture locali, dall'altro gli USA hanno il costo per megawatt più basso di qualsiasi Paese che riferisce all'Agenzia internazionale per l'energia. Anche l'aumento della domanda di manodopera rispetto all'offerta ha comportato un notevole aumento dei salari, riducendo il divario con gli Stati Uniti dove il costo del lavoro è rimasto invariato. Una ragione aggiuntiva che ha portato le aziende a non operare in alcuni Paesi è la volatilità del tasso di cambio. Un esempio è lo yuan cinese che è aumentato del 35% rispetto al dollaro, rendendo meno attraente l'acquisto dei prodotti cinesi [20].

Per quanto riguarda l'Italia, la motivazione in assoluto più rilevante è quella dell'effetto "made in", indicata, secondo un'analisi del gruppo di ricerca Uni-Club More *reshoring*, dal

34,7 % delle imprese rientrate [21]. È evidente, infatti, come a differenza degli altri Paesi il settore maggiormente interessato sia quello dell'abbigliamento (Figura 2 e Figura 3).

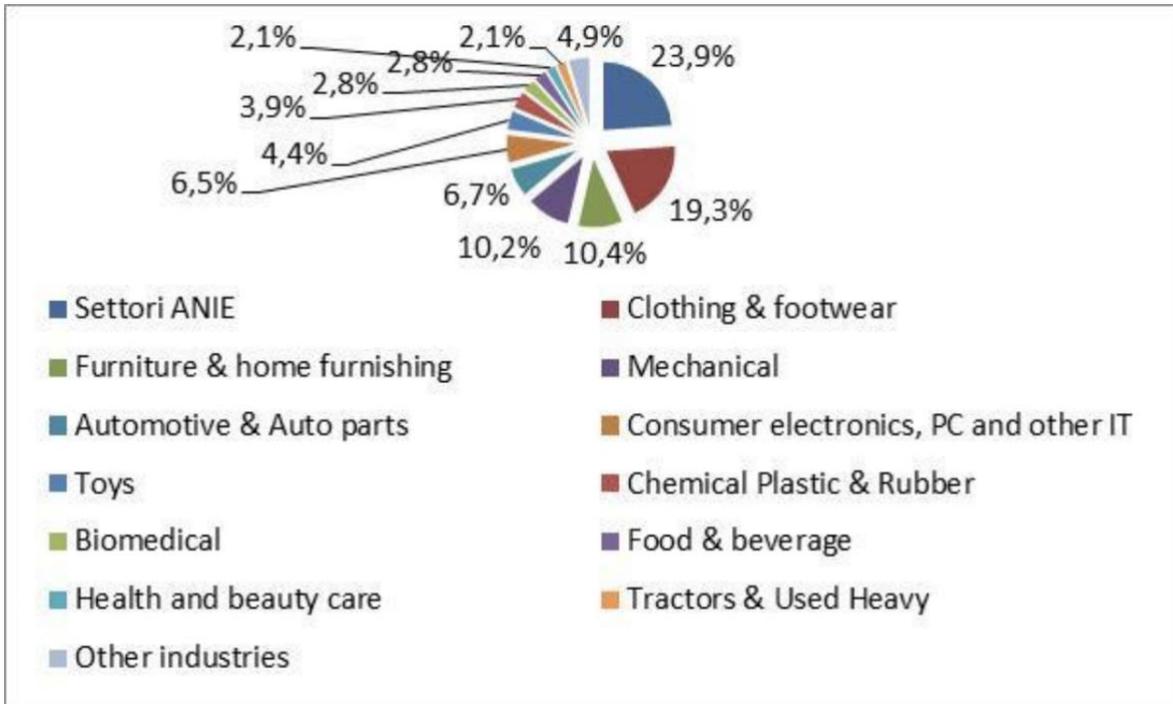


Figura 2: Settori maggiormente interessati dal reshoring nel mondo [22]

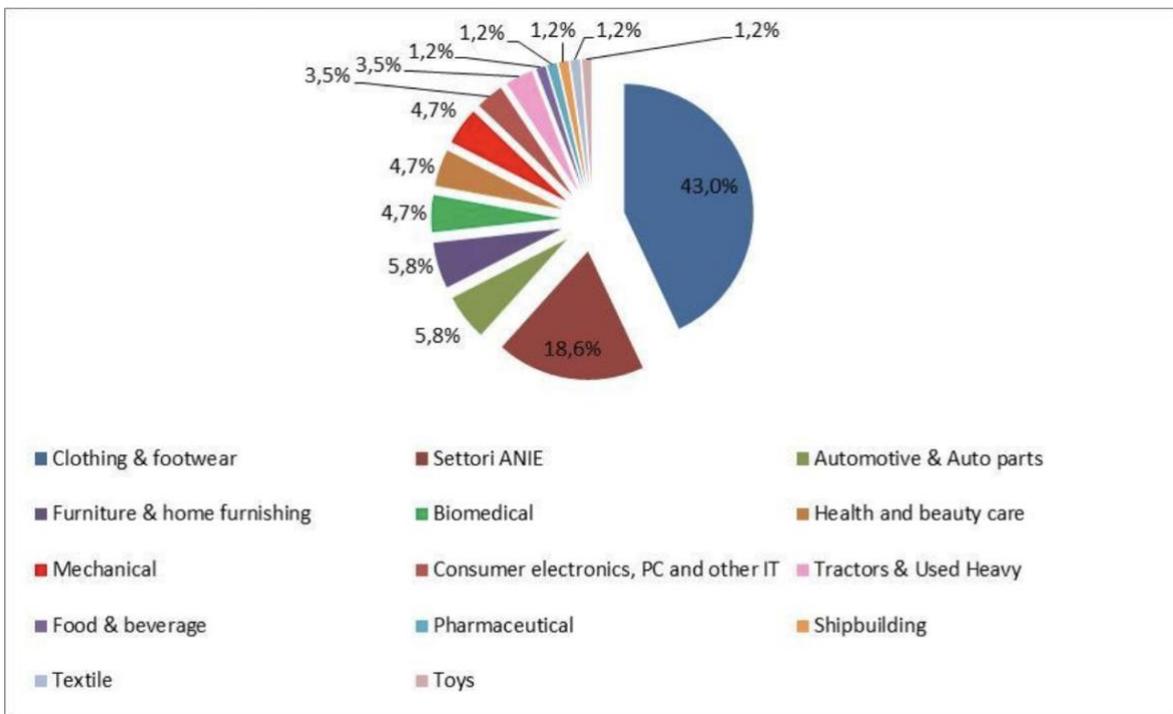


Figura 3: Settori maggiormente interessati dal reshoring in Italia [22]

---

## 1.5.2 Il ruolo del governo

Nell'implementazione della strategia di *reshoring* i governi hanno un ruolo fondamentale; gli incentivi statali possono, infatti, essere determinanti nelle decisioni aziendali.

Per quanto riguarda gli Stati Uniti la politica di “rimpatrio” è iniziata con l'amministrazione Obama che nel 2012 ha redatto il “*Blueprint for an American built to last*” con l'obiettivo di incoraggiare le aziende a creare posti di lavoro nel settore manifatturiero degli Stati Uniti attraverso incentivi fiscali e la promozione del made in Usa [23]. L'amministrazione Trump ha proseguito questa politica riducendo drasticamente la “*corporate tax*” dal 35% al 21%.

In Italia, al contrario, i maggiori sforzi di incentivazione si verificano a livello regionale piuttosto che a livello nazionale. In Puglia e in Veneto, ad esempio, è portato avanti dal 2015 il “progetto *reshoring*” con l'obiettivo di ridurre il gap di costo tra il “*made in Italy*” e l’*”out of Italy*” [21].

Tuttavia, benché la riduzione dei differenziali di costo e gli incentivi fiscali, possono spingere le aziende a ritornare a produrre nel Paese d'origine, è necessario che ci siano dei vantaggi di lungo-medio termine affinché questo cambio di rotta sia permanente. L'integrazione delle tecnologie dell'Industria 4.0 all'interno della Supply Chain possono essere, in futuro, un driver durevole per il *reshoring*.

---

## Capitolo 2 – Additive Manufacturing: le tecnologie

L'*Additive Manufacturing* (AM) o fabbricazione additiva (FA) comprende un'ampia gamma di processi produttivi aventi come principio di funzionamento la stratificazione di materiale su livelli paralleli e perpendicolari a un asse Z. La definizione originale la diede l'inventore del processo, Chuck Hull, che nel 1986 la definisce come "un sistema per generare oggetti tridimensionali creando lamine adiacenti che rappresentano le sezioni trasversali successive dell'oggetto, sulla superficie di un mezzo fluido capace di alterare il suo stato fisico in risposta a stimoli sinergici quali radiazioni, bombardamento di particelle o reazioni chimiche, le lamine vengono automaticamente integrate man mano che si formano per definire l'oggetto tridimensionale desiderato" [24].

Oggi la definizione ufficiale è data dall'*American Society for Testing and Materials* (ASTM) che definisce la fabbricazione additiva come "il processo di giunzione dei materiali per realizzare oggetti a partire da dati dei modelli 3D, solitamente strato su strato, in contrapposizione alle metodologie di fabbricazione per sottrazione" [25]. Le ragioni dell'utilizzo di questa tecnologia, infatti, risiedono nei vantaggi rispetto ai processi tradizionali: la natura additiva consente nuove libertà di progettazione; la natura digitale consente la produzione diretta a partire da modelli 3D e la sua natura priva di utensili consente una produzione più flessibile. La combinazione di queste caratteristiche permette di ottenere un vantaggio economico per le produzioni di oggetti personalizzati rispetto alle tecniche tradizionali ancora fortemente utilizzate nella produzione di massa [26].

### 2.1 Il processo

L'adozione delle tecniche di fabbricazione additiva è subordinata alla disponibilità di avere il modello matematico del componente che si vuole produrre su un sistema CAD

---

tridimensionale. Tale modello, rappresentante il corrispondente digitale dell'oggetto da costruire, deve descrivere perfettamente la superficie esterna della parte da realizzare.

Ci sono diverse regole di progettazione che devono essere considerate che si concentrano principalmente sulle caratteristiche geometriche del pezzo, su eventuali supporti da inserire e sui requisiti per la realizzazione dei fori [27].

Il modello CAD 3D viene convertito in un modello di tipo "Shell" tramite l'interfaccia STL (*Standard Triangulation Language*), con la quale superfici interne ed esterne sono approssimate con triangoli, definiti *mesh*, di differenti dimensioni, in base alla complessità geometrica e alla risoluzione richiesta. La generazione dei triangoli avviene in modo intelligente, ovvero, mantenendo l'errore cordale costante (generalmente 0.01 mm). Tuttavia, in questa fase, si riscontra l'errore del *facetting*, ossia l'approssimazione di superfici curve in superfici piane [28].

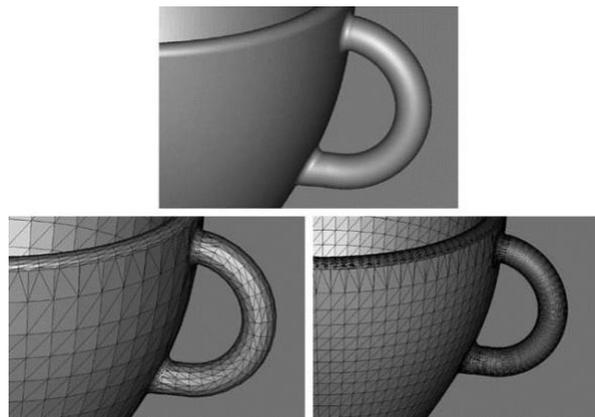


Figura 4: Un esempio di conversione del modello CAD 3D in formato STL [29]

Il file STL realizzato viene inserito nel software di gestione della macchina di fabbricazione additiva, attraverso il quale il progettista è in grado di definire i parametri di costruzione tra cui altezza dello strato, velocità di estrusione, velocità dell'ugello. Inoltre, si definisce l'orientamento del pezzo e si generano in modo automatico i supporti qualora il processo additivo lo richieda. Questi solitamente sono dello stesso materiale del componente che si sta costruendo, ma possono essere di materiale differente nel caso di tecnologie a filamento in cui siano presenti più ugelli all'interno della macchina. La loro funzione è triplice:

- 
1. Ancorare il modello in costruzione all'area di lavoro
  2. Supportare le pareti sporgenti
  3. Permettere il rilascio delle tensioni residue.

Inoltre, la geometria dei supporti e la scelta del materiale con cui essi sono realizzati sono fondamentali per facilitare la rimozione ultimata la lavorazione.

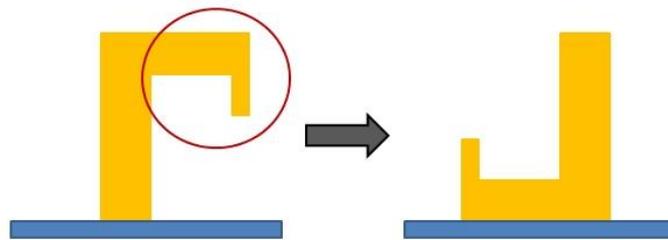


Figura 5: Orientamento oggetto [30]

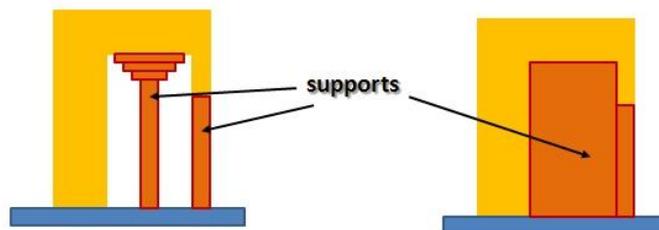


Figura 6: Creazione supporti [30]

Successivamente si passa allo *slicing*, effettuato tramite un software CAM dedicato. Nello specifico il programma converte il file STL in un file di codice G, un linguaggio di programmazione a controllo numerico (NC) o in un formato proprietario della macchina. Il modello 3D, convertito nel formato STL, è suddiviso in sezioni attraverso la generazione di piani paralleli disposti perpendicolarmente rispetto all'asse di costruzione (che convenzionalmente coincide con l'asse Z) [27]. La fase dello *slicing*, tuttavia, causa quello che viene definito effetto *staircase* soprattutto quanto gli strati sono superiori ai 30  $\mu\text{m}$  come mostrato in Figura 7 [31]. Il processo di sezione e sovrapposizione dei vari strati, infatti, crea il cosiddetto effetto scala che genera problemi di qualità superficiale; i quali hanno impatto diretto sui tempi e costi dei processi di post-trattamento, sull'estetica e sulla funzionalità dell'oggetto realizzato [32].

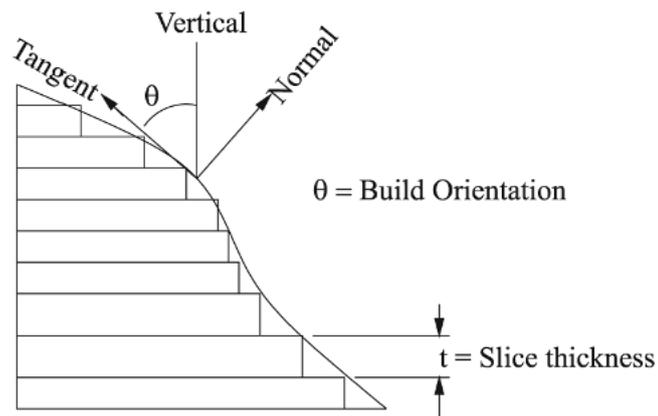


Figura 7: Effetto staircase [33]

È possibile effettuare due tipi di slicing: esterno, con il quale viene depositato un eccesso di materiale; interno, con assenza di materiale (Figura 8).

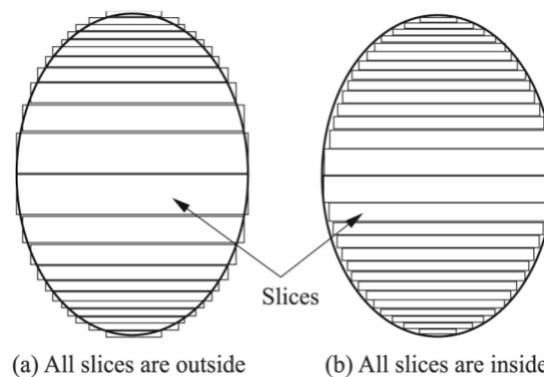


Figura 8: Un esempio di slicing interno ed esterno [33]

La scelta dipende dall'utilizzo finale dell'oggetto da realizzare: il primo caso è adatto, ad esempio, alla realizzazione di anime, poiché un'anima più piccola implicherebbe materiale extra nella fase di post-trattamento; il secondo, al contrario, è consigliato per la realizzazione di prototipi ad uso concettuale [33]. In aggiunta, per minimizzare l'effetto staircase, è possibile avere uno slicing di tipo adattivo, ovvero, in base alla geometria della superficie. Sono presenti, così, degli strati di spessore maggiore in corrispondenza di superfici vicine

---

all'asse verticale, e strati di spessore minore man mano che si è in prossimità della parte orizzontale del pezzo.

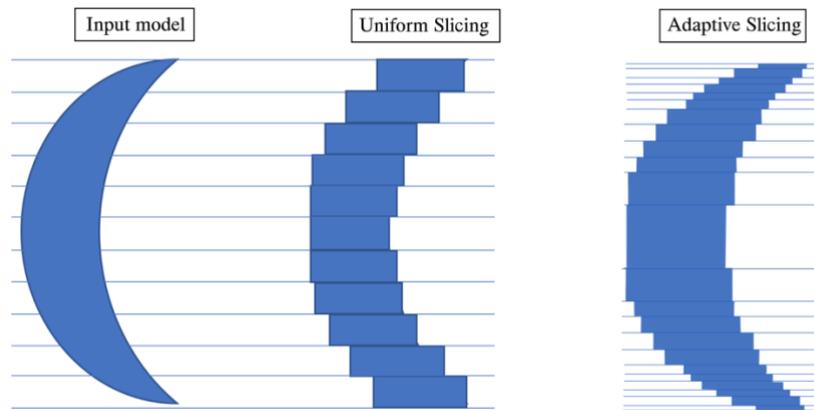


Figura 9: Differenza tra slicing costante e adattivo [34]

Successivamente, si procede alla realizzazione fisica dell'oggetto, le modalità attraverso la quale viene effettuata variano in base alla tecnica di fabbricazione additiva che viene utilizzata.

È necessario, inoltre, nella maggior parte dei casi, una fase di post-trattamento, durante la quale sono eseguiti tre processi: rimozione dei supporti ove richiesto, stabilizzazione delle geometrie e finitura superficiale. Il primo processo è strettamente legato al metodo di stampa e al tipo di materiale utilizzato [35]: la rimozione, infatti, può avvenire manualmente (attraverso l'utilizzo di pinze), tramite l'utilizzo di forni ad alte temperature, tramite sistemi ad abrasione meccanica o ad ultrasuoni, oppure tramite l'immersione del pezzo in un liquido (nel caso di supporti solubili). Per quel che concerne il secondo processo, la stabilizzazione viene effettuata mediante l'utilizzo di forni ad alta temperatura, oppure, tramite un forno con luce UV. Infine, la finitura superficiale è necessaria per migliorare il pezzo sia dal punto di vista funzionale che estetico, infatti, nonostante la fabbricazione additiva abbia molteplici aspetti positivi, l'energia sprigionata durante la costruzione può produrre effetti dannosi quali vuoti, tensioni residue e distorsioni risultanti. Di conseguenza processi come la pallinatura e la post-elaborazione termica sono utilizzati per alleviare le tensioni residue e per migliorare la microstruttura [36].

---

## 2.2 Tecniche di fabbricazione additiva

La classificazione dei processi di fabbricazione additiva è sempre stata una questione controversa sin dalla comparsa delle prime tecniche di produzione per la realizzazione degli oggetti [37]. In letteratura esistono differenti classificazioni delle varie tecniche tra cui:

1. in base al tipo di materiale utilizzato (polimeri, metalli o ceramiche)
2. in base al tipo di processo (diretto o indiretto)
3. in base allo stato del materiale grezzo (liquido, solido, polvere o fuso) [38].

Nel 2015 l'ASTM definisce una classificazione standard, suddividendo i processi in sette categorie [39]:

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)*

### 2.2.1 Binder jetting

Questa tecnologia è stata sviluppata negli anni '90 presso il MIT per poi essere commercializzata nel 2010. L'oggetto viene realizzato attraverso la deposizione selettiva di un liquido legante su un letto di polvere; il processo inizia con la stesura, attraverso un rullo, di un primo strato di polvere sulla piattaforma di stampa, successivamente goccioline di liquido legante vengono depositate tramite una testina di stampa *drop-on-demand*. Dopo ogni livello, la piattaforma di stampa si abbassa, un nuovo strato di polvere viene steso e il legante viene nuovamente depositato [40]. La procedura viene ripetuta fino al completamento dell'oggetto (Figura 10).

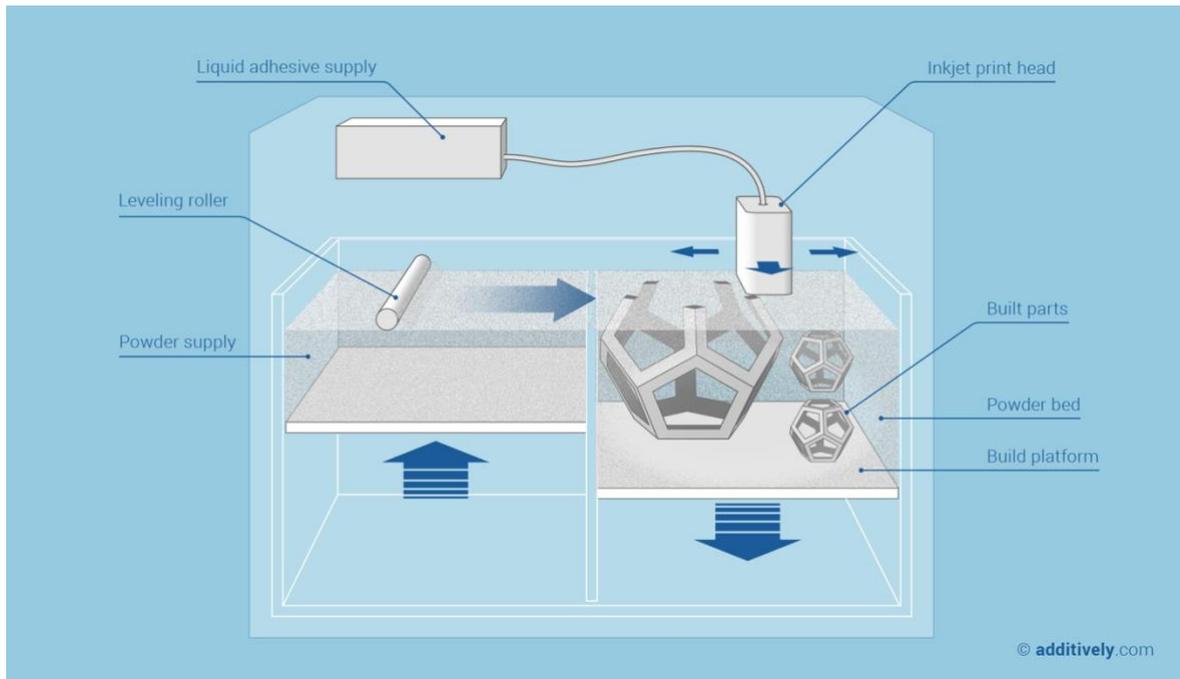


Figura 10: Binder jetting schema [41]

Al termine del processo di stampa è necessario effettuare diverse fasi di post-elaborazione che dipendono dal tipo di polvere e di legante utilizzato e dalle proprietà desiderate. Occorre, innanzitutto, separare l'oggetto dalla polvere non legata; tuttavia, prima di effettuare questo processo, è necessaria una fase di polimerizzazione (il letto di polvere viene riscaldato per rimuovere il solvente residuo) per ottenere una resistenza adeguata. Successivamente, per densificare la parte realizzata e migliorare le sue proprietà meccaniche, si ha il processo di sinterizzazione [42]. L'oggetto viene posto in un forno ad alta temperatura, il legante viene bruciato e le particelle vengono sinterizzate (legate) tra di loro [43]. Questa procedura, tuttavia, comporta anche una contrazione dell'oggetto di circa il 15-20%. Infine, per riempire i vuoti lasciati dal legante bruciato, la parte è sottoposta alla fase di infiltrazione [44]. Questi, infatti, possono essere riempiti con un infiltrante organico (generalmente si utilizzano materiali a base di amido per modelli estetici). Nella maggior parte dei casi, si utilizza un infiltrante metallico (il bronzo) per migliorare le prestazioni meccaniche dell'oggetto e ottenere una densità più elevata.

I principali vantaggi della tecnologia *binder jetting* sono il tempo di stampaggio e l'assenza di supporti; in aggiunta, se confrontato con altre tecniche additive, il processo può essere definito economico, infatti, è possibile riciclare tutta la polvere non utilizzata nella fase di

---

stampaggio. Altri aspetti importanti sono: l'ampia gamma di materiali da poter utilizzare e il volume di lavoro che risulta essere tra i più grandi se paragonato a quelli di altre tecnologie di AM [45].

Tuttavia, a causa dell'utilizzo di materiale legante, la tecnologia non è adatta alla realizzazione di parti strutturali [46], ma è utilizzata principalmente per la prototipazione, per la realizzazione di stampi o anime e modelli per la fusione [47]. Inoltre, la post-elaborazione aggiuntiva comporta un aumento del tempo e dei costi di realizzazione [48].

## 2.2.2 Directed energy deposition

A differenza del processo descritto in precedenza, questa tecnologia non sfrutta il principio di portare a fusione un letto di polvere ma, consiste nell'apportare direttamente il materiale nella zona interessata sfruttando un principio analogo a quello della saldatura. Durante il processo il materiale viene depositato e fuso in modo simultaneo grazie a una fonte di calore focalizzata, questa può essere un laser, un fascio di elettroni o un arco di plasma (Figura 11).

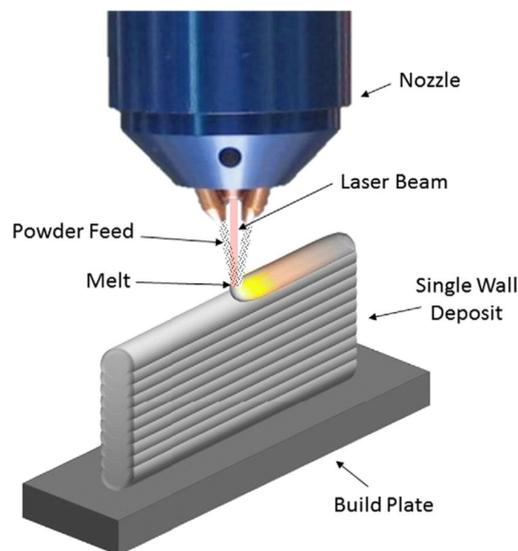


Figura 11: Directed energy deposition schema [49]

La materia prima utilizzata è polvere metallica o filo. Per quanto riguarda la prima, il suo utilizzo comporta un'efficienza ridotta nella deposizione poiché solo una parte viene fusa e incollata al substrato [50].

---

Per evitare l'ossidazione, il processo avviene, nella maggior parte dei casi, sotto gas inerte (per sistemi ad arco o laser) o sottovuoto (per sistemi con fascio di elettroni) [51]. I sistemi DED possono utilizzare ugelli singoli o multipli per la deposizione del materiale. La presenza di più ugelli permette di creare leghe direttamente all'interno della macchina. In aggiunta, la fonte di calore può essere collegata a bracci a 4 o 5 assi che consentono di stampare il metallo su superfici curve come, ad esempio, strutture metalliche già esistenti [52]. Questo vantaggio, aggiunto alla possibilità di depositare il materiale su superfici sottili con un alto grado di precisione, ha consentito l'utilizzo di questa tecnologia in diversi ambiti tra cui: la riparazione di parti danneggiate (ad esempio pale di turbine, compressori e camere di combustione del motore) e la correzione di difetti; la fornitura di rivestimenti resistenti all'usura per una particolare area o la protezione di aree specifiche di un oggetto dalla corrosione [53] [54]. Inoltre, dal punto di vista geometrico, date le caratteristiche del processo, non ci sono sostanziali limiti sulle dimensioni dei volumi da poter realizzare, in quanto è la testina che si sposta sul piano ed intorno al componente in fase di lavorazione. Questo, però, comporta una limitazione delle forme geometriche realizzabili, ad esempio risulta impossibile ottenere elementi sporgenti. Inoltre, dopo il processo di stampaggio è necessario un post-trattamento per effettuare la finitura superficiale, tramite lavorazioni ad asportazione di materiale [28].

### **2.2.3 Material extrusion**

Il processo di estrusione di materiale è stato inventato e brevettato da *Stratasys* nel 1989 e introdotto sul mercato come *Fused deposition modelling* (FDM) [55]. È una delle tecniche additive più famose in assoluto in quanto è stata la prima tecnica ad essere utilizzata per la realizzazione di un componente con materiale termoplastico definitivo.

Come indica il nome, l'oggetto viene realizzato tramite l'estrusione riscaldata di materiale che viene depositato, selettivamente, strato dopo strato. Durante la stampa sono utilizzati due materiali termoplastici semifusi: uno necessario alla costruzione del pezzo e l'altro alla realizzazione dei supporti. I due tipi di materiale vengono estrusi da due ugelli separati e, muovendosi sul piano XY, depositano il materiale per creare il primo strato; successivamente la piattaforma di lavoro si abbassa lungo l'asse Z permettendo di comporre

---

lo strato successivo. Il processo prosegue fino al completamento del pezzo, la Figura 12 ne mostra una rappresentazione.

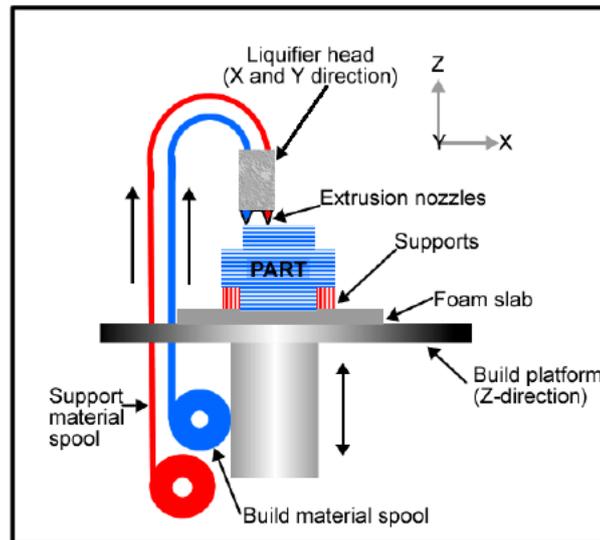


Figura 12: Material extrusion schema [56]

Durante la fase di costruzione è necessario, inoltre, un attento controllo dei parametri di processo; nello specifico, la temperatura di estrusione deve essere adeguata affinché gli strati aderiscano perfettamente: un valore troppo basso impedirebbe l'adesione dello strato con quello precedentemente depositato; una temperatura eccessivamente alta, al contrario, causerebbe una colatura di materiale [28]. In aggiunta, la maggior parte dei parametri decisionali per il processo FDM sono determinati automaticamente, il che rende il processo poco flessibile.

Una volta conclusa la lavorazione, si procede con la rimozione dei supporti; questa procedura, generalmente semplificata dall'utilizzo di colori differenti tra i due tipi di materiale, si compone di due fasi: inizialmente la rimozione avviene manualmente; in un secondo momento il materiale residuo viene sciolto inserendo il pezzo all'interno di una vasca contenente acqua e soda caustica [28].

Come detto in precedenza, la possibilità di realizzare componenti definiti e la facilità nella rimozione dei supporti, ha permesso ai sistemi FDM di essere ampiamente versatili. I campi di applicazione sono diversi e vanno dalla prototipazione rapida ed economica alla

---

realizzazione di parti resistenti e rigide adatte all'uso finale. Ulteriori vantaggi sono: l'assenza di lavorazioni di post trattamento e l'assenza di problemi di sicurezza legati alla macchina (la lavorazione avviene all'interno della macchina e non c'è alcun contatto con l'operatore). Inoltre, è una tecnologia che permette di ottenere un componente con tolleranze dimensionali e rugosità superficiali soddisfacenti. I principali limiti della tecnologia sono: il tempo di costruzione, la limitata velocità della macchina dipende dalla presenza di soltanto due ugelli per estrudere il materiale e l'impossibilità di sfruttare l'intero volume di lavoro, non è possibile realizzare un pezzo sopra l'altro a causa dell'eccessiva difficoltà nella rimozione del supporto [28].

## 2.2.4 Material jetting

Questa tecnica consiste nella realizzazione di oggetti tridimensionali attraverso la deposizione di goccioline di materiale fotopolimerico liquido tramite testine di stampa piezoelettriche e polimerizzando il materiale depositato attraverso lampade UV. I supporti sono sempre presenti e vengono generati automaticamente e depositati contemporaneamente ai fotopolimeri [57]. Inoltre, grazie alla presenza di più ugelli, sono sempre realizzati in un materiale solubile, di conseguenza la loro rimozione avviene facilmente mediante l'immersione in un bagno a ultrasuoni o utilizzando acqua pressurizzata [58].

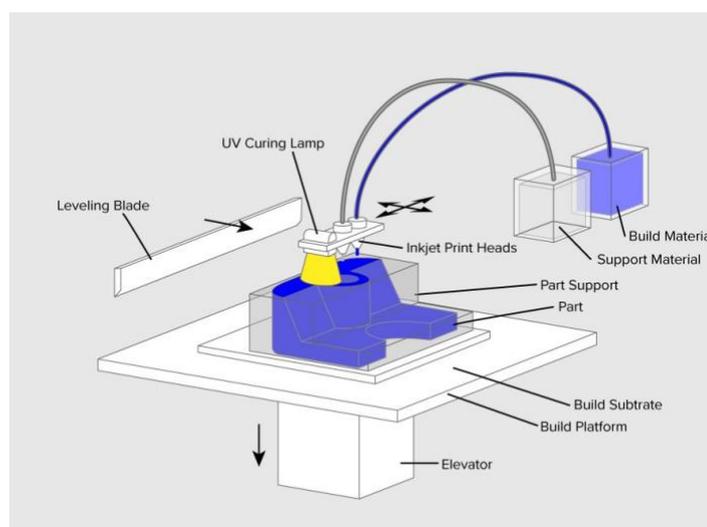


Figura 13: Material jetting schema [59]

---

Nonostante il principio di base sia quello descritto in precedenza, il modo in cui viene depositato il materiale può essere differente; può avvenire, infatti, tramite un getto continuo oppure tramite l'utilizzo di testine *drop-on-demand*. Quest'ultima tecnica permette l'utilizzo di liquidi viscosi ed è utilizzata esclusivamente per la produzione di modelli a perdere per microfusione in settori come la gioielleria e la meccanica di precisione [60].

Ad oggi i materiali utilizzati sono i fotomoliperi (in forma liquida) e le cere.

Il principale vantaggio di questa tecnologia è la possibilità di ottenere un oggetto multicolore e multi-materiale nello stesso volume di stampa, grazie, come detto in precedenza, alla presenza di più ugelli [60]. Il processo assicura buone prestazioni sia in termini di tolleranze dimensionali che di rugosità superficiali, inoltre, l'elevata accuratezza nella deposizione delle gocce permette di avere scarti ridotti. Un ulteriore vantaggio è la possibilità di produrre elementi traslucidi. [61]

I principali limiti, invece, sono il tempo di realizzazione degli oggetti e l'elevato costo della tecnologia. In aggiunta, le parti realizzate possiedono scarse qualità meccaniche, di conseguenza, questa tecnologia non è adatta alla realizzazione di parti finali ma è perfetta per la produzione di prototipi funzionali.

## 2.2.5 Powder bed fusion

La fusione del letto di polvere (PBF) è una tecnica che utilizza una fonte di calore (ad esempio, laser) per fondere e sinterizzare selettivamente un letto di polvere, realizzando, così, oggetti tridimensionali. A seconda del tipo di alimentazione utilizzata è possibile suddividere la tecnologia in due principali categorie: fusione o sinterizzazione laser (rispettivamente SLM e SLS) e la fusione a fascio di elettroni (EBM) [62]. Il processo di base è analogo: inizialmente viene depositato uno strato di polvere sulla piattaforma di lavoro cui segue il passaggio di un rullo per effettuare un livellamento della superficie. Successivamente una sorgente laser o un fascio di elettroni, di adeguata potenza, fonde le particelle. Al termine di questa fase, l'elevatore fa abbassare la piattaforma di lavoro di un delta, permettendo nuovamente l'alimentazione della polvere e la successiva fusione [63]. La Figura 14 mostra uno schema del processo appena descritto.

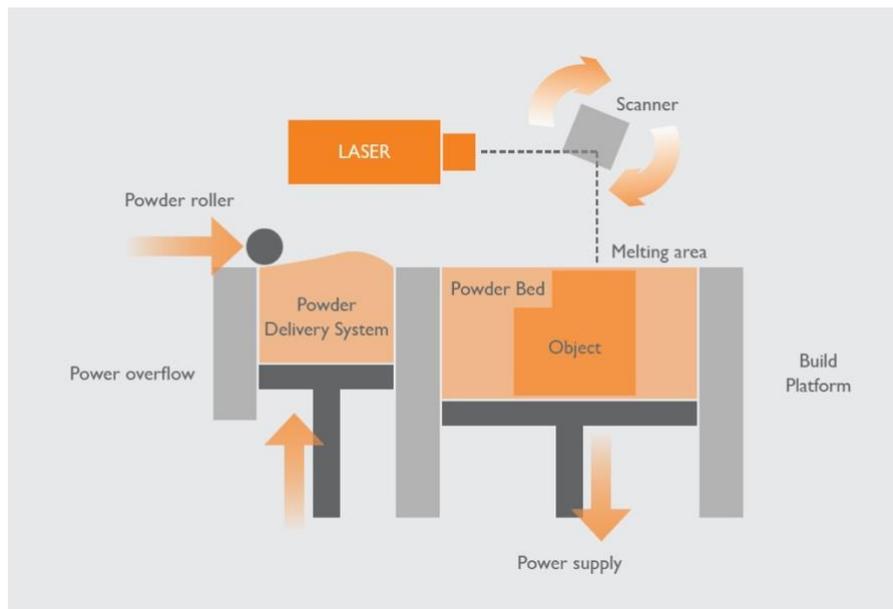


Figura 14: Powder bed fusion schema [64]

Completato lo stampaggio dell'oggetto, la polvere non processata viene recuperata e riutilizzata. Nel caso della fusione tramite raggio laser, la macchina di costruzione è riempita di gas inerte (nella maggior parte dei casi argon) per evitare l'ossidazione del metallo che si scioglie e si risolidifica e l'innescò di incendi. Per lo stesso motivo, nel caso del fascio di elettroni, durante il processo, è necessario ottenere un sottovuoto spinto (dell'ordine di  $10^{-5}$  mbar) [62]. Inoltre, la tecnologia SLS è utilizzata sia per materiali polimerici che per compositi polimerici con piccole percentuali di metallo, mentre le altre tecniche precedentemente citate utilizzano solo polveri metalliche. Questa tecnica condivide i principi di base di tutte le tecnologie AM (ad esempio, fabbricazione strato per strato direttamente dai dati del modello 3D), tuttavia ha un vantaggio significativo rispetto a molti altri processi, infatti, nel caso in cui si utilizza materiale polimerico, non sono richieste strutture di supporto, poiché le sporgenze sono supportate dal letto di polvere (non fuso) circostante. Ciò implica da un lato la possibilità di realizzare geometrie più complesse e di sfruttare l'intero volume di lavoro; dall'altro, l'allungamento dei tempi necessari per eliminare la polvere in eccesso dal prodotto finito e per pulire accuratamente l'intera camera di lavoro tra una lavorazione e l'altra [63]. Nel caso dei metalli, invece, i supporti sono necessari per evitare il distacco del componente dalla piattaforma a causa del ritiro durante il processo di solidificazione e per ridurre gli stress termici durante la costruzione.

---

Le principali applicazioni di questa tecnologia sono: produzione di modelli sacrificali per la fusione a cera persa (riguarda però soltanto il 10% circa delle applicazioni); realizzazione di prototipi funzionali e realizzazione diretta di parti definitive [28].

## 2.2.6 Sheet lamination

La laminazione di fogli è definita come "un processo di produzione additiva in cui fogli di materiale vengono incollati per formare un oggetto" [65]. Esistono diverse classificazioni delle varie tecniche: in base al tipo di materiale (carta, plastica o metallo); in base alla tecnica di laminazione che si utilizza per unire insieme i fogli (incollaggio adesivo, incollaggio termico o saldatura a ultrasuoni) [66]. Le principali tecniche sono:

1. produzione assistita da computer di materiali ingegneristici laminati (CAM-LEM)
2. produzione di oggetti laminati (LOM)
3. laminazione di fogli di plastica (PSL)
4. laminazione a deposizione selettiva (SDL)
5. produzione additiva ad ultrasuoni (UAM)
6. consolidamento ultrasonico (UC)

Il processo inizia con un singolo strato di materiale solido posto sulla superficie di costruzione, carta nel caso di LOM e SDL, plastica per la PSL, metallo per UAM e UC o ceramica per i sistemi CAM-LEM. L'unione dello strato agli altri dipende dal processo: alcuni processi (SDL o UAM) uniscono prima tutti gli strati e successivamente procedono alla fase di tagli per ottenere la forma desiderata; nel caso del sistema CAM-LEM, invece, ogni foglio viene prima tagliato e successivamente unito allo strato precedente. Anche il legame tra ogni strato avviene con diversi metodi: per SDL e PSL, l'incollaggio viene eseguito applicando un tipo di colla sulla superficie di costruzione; nei sistemi LOM gli strati sono legati insieme attraverso la fusione di un polimero incorporato nel rotolo di carta. Inoltre, per la fase di taglio è possibile utilizzare un laser (LOM / CAM-LEM), una lama (SDL / PSL) o una macchina CNC tradizionale (UAM / UC). In Figura 15 è rappresentato uno schema del funzionamento del sistema LOM.

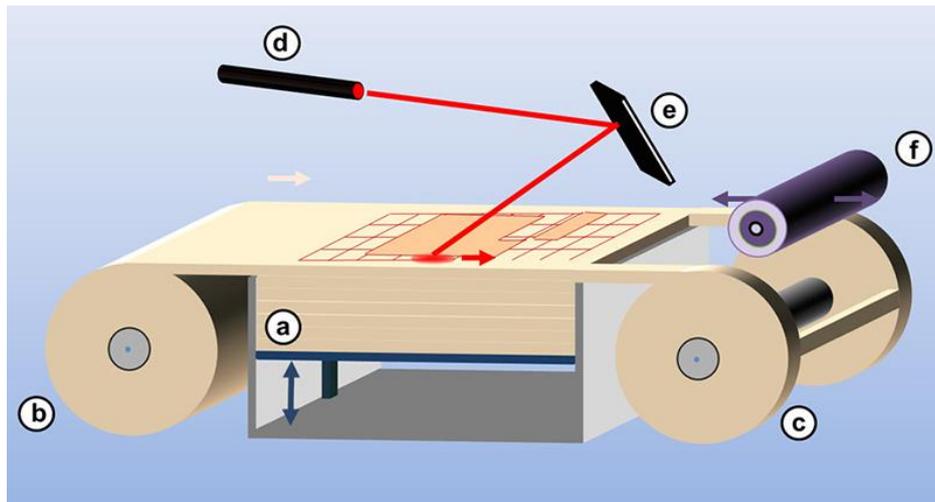


Figura 15: Sistema LOM schema [67]

I vantaggi di questo processo dipendono direttamente dalla tecnica utilizzata. SDL può eseguire stampe a colori, è relativamente poco costosa poiché la materia prima è la normale carta da ufficio. Con il sistema UC si ha la possibilità creare strati multi-metallo, mentre la tecnica CAM-LEM permette di realizzare parti in ceramica. Non è necessario alcun materiale di supporto poiché ogni strato è già solido e può sostenersi da solo, sebbene, essendo un processo parzialmente sottrattivo, non è in grado di produrre la stessa complessità geometrica di altri processi di stampa 3D. Potrebbe non essere possibile accedere alle parti interne di un oggetto per rimuovere il materiale in eccesso per creare vuoti interni o cavità.

Uno svantaggio comune di tutti i processi è l'impossibilità di modificare lo spessore dello strato senza modificare lo spessore dei fogli di materiale utilizzati. Pertanto, la qualità finale della parte realizzata dipende dallo spessore di ogni foglio. In aggiunta, viene consumato un intero foglio per strato indipendentemente dalle dimensioni della parte prodotta, quindi lo spreco di materiale può essere elevato se le parti non sfruttano appieno il volume di costruzione [68].

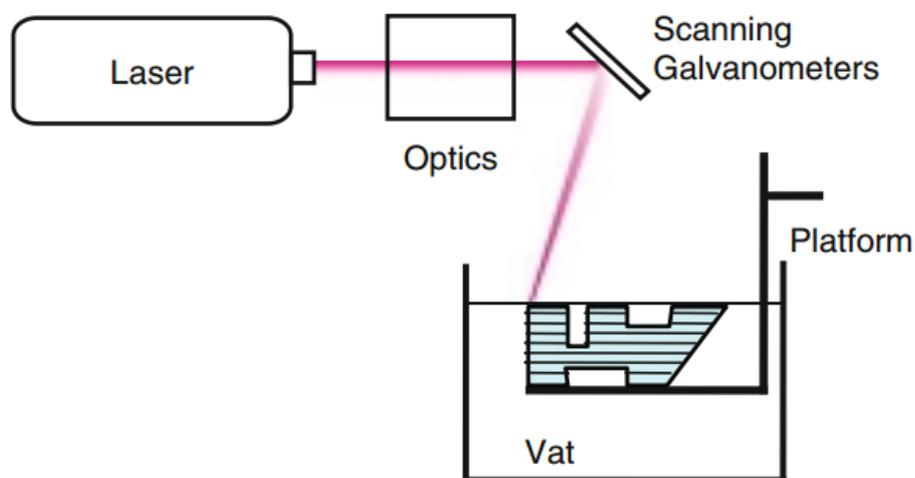
## 2.2.7 Vat photopolymerization

La fotopolimerizzazione, ovvero la polimerizzazione indotta dalla luce, è un processo additivo in cui i materiali vengono inseriti in una vasca e successivamente polimerizzati strato per strato attraverso una fonte di luce [69]. La Stereolitografia, che è anche la prima

---

tecnica di produzione additiva comparsa sul mercato, è un sistema di fotopolimerizzazione in vasca.

Tutti i tipi di fotopolimerizzazione in vasca utilizzano come materiale di stampa delle resine speciali chiamate fotopolimeri. Le molecole dei fotopolimeri quando sono esposte a determinate lunghezze d'onda della luce, si legano rapidamente passando dallo stato liquido a quello solido [70]. Il sistema è composto nella parte inferiore, come detto precedentemente, da una vasca contenente il fotopolimero liquido e un elevatore; nella parte superiore da una fonte di luce che può essere un proiettore DLP, una lampadina UV oppure un laser fisso. Nel caso venga utilizzato quest'ultimo, la focalizzazione avviene tramite un sistema di specchi controllati attraverso un galvanometro. All'inizio del processo l'elevatore è posizionato vicino alla superficie del liquido e il laser indurisce la prima sezione realizzata tramite lo slicing; successivamente l'elevatore scende lungo l'asse z di una quantità pari allo spessore del secondo strato che viene nuovamente indurito tramite il laser. Il processo continua fino al completamento dell'oggetto [71] [28]. Uno schema del processo è riportato in Figura 16.



*Figura 16: Vat photopolymerization schema [72]*

Durante la costruzione della parte sono necessari i supporti per separare il prototipo dalla piattaforma di lavoro e per sostenere le parti sporgenti impedendone la deformazione. Questi, una volta terminata la costruzione, vengono rimossi dall'operatore meccanicamente.

---

Questa tecnica permette di ottenere finiture superficiali con dettagli molto elevati. Attualmente è il processo più preciso presente sul mercato, che garantisce la migliore qualità superficiale. Il principale svantaggio è, invece, il tipo di materiale che viene utilizzato. I fotopolimeri appartengono alla famiglia dei materiali termoindurenti, ovvero materiali non riciclabili; questo implica che questa tecnologia non può essere impiegata per la realizzazione di beni di largo consumo ma è adatta alla costruzione di prototipi funzionali ed estetici [28].

---

## Capitolo 3 – I benefici, limiti e standard

### 3.1 Benefici dell'AM

Il forte impatto dell'AM sui processi di produzione è dovuto ai suoi vantaggi rispetto alle tecniche tradizionali. Essendo un processo “*start-to-finish*”, infatti, si ha la possibilità di realizzare parti integrate senza dover ricorrere a più lavorazioni e all'utilizzo di più macchine [73]. Utilizzando tecniche additive, un assemblaggio di parti realizzate con lo stesso materiale può essere fabbricato come un unico pezzo, il che riduce o elimina i problemi di costi, tempi e qualità, derivanti dalle operazioni di assemblaggio [74]. Inoltre, rispetto all'approccio classico, offre una maggiore libertà di progettazione. In linea di principio qualunque oggetto che sia progettabile con CAD può essere realizzato. [75] I progettisti, infatti, sono condizionati dal realizzare il design migliore dell'oggetto a causa dei limiti di produzione delle macchine tradizionali. Con la fabbricazione additiva, al contrario, i designer hanno la possibilità di progettare le parti tenendo solo in considerazione le applicazioni per cui queste sono realizzate. Inoltre, dal punto di vista economico la complessità geometrica non comporta nessun aumento dei costi. Poiché il prodotto viene realizzato strato per strato, i costi e i tempi necessari per produrre una parte complessa sono essenzialmente gli stessi di quelli per una parte semplice. Rispetto alla produzione convenzionale, è possibile realizzare forme contorte, reticoli e fori ciechi [76] [73] [75] [28]. In aggiunta si ha la possibilità di personalizzare e modificare gli oggetti in maniera quasi istantanea; questo permette la sincronizzazione della produzione con le richieste dei clienti [77]. Un ulteriore vantaggio è la sostenibilità ambientale del processo: se l'approccio tradizionale si basa su processi sottrattivi dove l'oggetto viene realizzato tramite l'asportazione di materiale da un pezzo iniziale, i processi AM utilizzano solo il materiale strettamente necessario alla creazione del pezzo. Inoltre, tutto il materiale non utilizzato durante la produzione (ad esempio le polveri) viene riciclato e riutilizzato. Per quanto

---

concerne il prodotto, è possibile realizzare delle strutture più leggere inserendo materiale solo dove necessario, nella Figura 17 è riportato un esempio.



*Figura 17: Protesi realizzati tramite fabbricazione additiva [75]*

Attraverso la fabbricazione additiva è possibile avere importanti miglioramenti nella catena di fornitura. Un esempio è la possibilità per i piccoli produttori di localizzare la produzione vicino ai clienti. Questo aspetto sarà approfondito nei paragrafi successivi.

## **3.2 Motivazioni economiche**

È importante indagare sulle implicazioni economiche che derivano dall'adozione dell'AM rispetto all'utilizzo delle tecniche tradizionali.

Rispetto ai metodi tradizionali, la fabbricazione additiva non beneficia dell'economie di scala; le ragioni principali sono: la velocità e la limitata capacità di costruzione. Pertanto, la produzione in serie di parti standardizzate rimarrà probabilmente il dominio delle tecnologie di produzione convenzionali [78] [79]. Alcuni studi [80] [81] hanno dimostrato che all'aumentare delle unità prodotte, si beneficia di una riduzione dei costi iniziali per poi avere

---

una stabilizzazione di questi ultimi. La Figura 18 mostra un confronto tra l'andamento dei costi della fabbricazione additiva e delle tecniche tradizionali all'aumentare dei volumi di produzione.

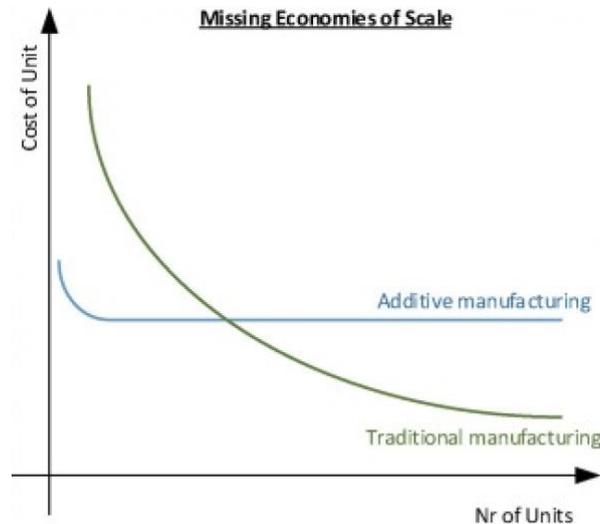


Figura 18: Andamento della funzione di costo in relazione alle unità prodotte [78]

Tuttavia, questo potrebbe rappresentare un vantaggio per le aziende in quanto la produzione di massa si sta spostando verso i paesi in via di sviluppo mentre i mercati dell'UE e degli Stati Uniti sono maggiormente concentrati su piccole produzioni ad alto valore aggiunto caratterizzate da innovazione, personalizzazione e sostenibilità [78].

Considerando i costi diretti di produzione: utensili, costi delle macchine, materiali e manodopera, si può fare un raffronto economico tra le due tecnologie. In alcuni casi, il costo degli utensili può superare il costo unitario di ogni parte aggiuntiva. Ad esempio, in un confronto tra AM e stampaggio a iniezione (IM) per la produzione di componenti elettrici, i ricercatori (aggiungi cit) hanno associato alla creazione dello stampo il 93,5% dei costi totali. Inoltre, gli strumenti prodotti, devono essere sottoposti a manutenzione, immagazzinati e spesso monitorati per lunghi periodi di tempo. Un beneficio chiave dell'AM è la capacità di migliorare o eliminare i costi associati agli strumenti.

Al contrario, il costo di acquisto dalle macchine domina la struttura dei costi delle tecniche di fabbricazione additiva, rappresentando il 60-70% dei costi diretti totali. L'elevato investimento iniziale, può essere, infatti, una barriera all'ingresso per molte aziende.

---

Per quel che concerne il costo dei materiali, nei sistemi AM, corrisponde a circa il 30% del costo unitario rispetto a un ammontare quasi irrilevante nei i processi tradizionali (intorno al 2%). La differenza tra il prezzo delle materie prime delle due metodologie è enorme: i termoplastici e i fotopolimeri utilizzati per applicazione AM possono costare 175-250\$ al kg, mentre quelli utilizzati per IM hanno un prezzo di 2-3 \$ al kg. Non esistono, invece, studi approfonditi che evidenziano differenze significative per quel che concerne i costi della manodopera [82].

Il confronto dei due processi solo dal punto di vista dei costi diretti risulta essere limitato; al giorno d'oggi, infatti, il ciclo di vita dei prodotti è sempre più breve, di conseguenza la possibilità di ridurre la fase di progettazione, per potere velocizzare la commercializzazione dei prodotti, può fornire un importante vantaggio competitivo alle aziende.

La fabbricazione additiva consente di ridurre i tempi di produzione dei prototipi e di velocizzare le fasi successive di produzione poiché non è necessario nessun investimento nella progettazione e nella fabbricazione delle attrezzature e dei dispositivi necessari alla costruzione del prodotto [74]. Ciò permette di ridurre il *time to market* totale.

Inoltre, la tecnologia, come detto in precedenza, consente di progettare design complessi senza avere variazioni sul costo totale di produzione. Gli input delle macchine, infatti, non dipendono dalla complessità geometrica del pezzo da realizzare. Nei metodi di produzione tradizionali, al contrario, alti livelli di personalizzazione dei prodotti potrebbero comportare costi di produzione elevati. Ciò è dovuto ai notevoli investimenti nelle modifiche della linea di produzione. La Figura 19 mostra l'andamento dei costi dell'AM e dei processi tradizionali all'aumentare della complessità geometrica [78].

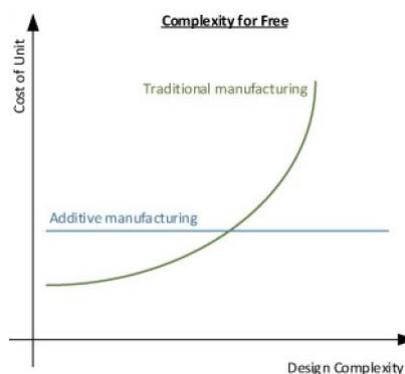


Figura 19: Andamento della funzione di costo in relazione alla complessità geometrica [78]

---

La personalizzazione del prodotto produce potenzialmente un aumento del valore percepito dai consumatori e quindi una maggiore disponibilità a pagare. Questo è il motivo per cui le aziende possono applicare un sovrapprezzo generando maggiori profitti. L'AM consente ai clienti di co-progettare prodotti che si adattano perfettamente alle loro richieste. Numerosi siti Web consentono già ai consumatori di creare singoli prodotti alterando i parametri di progettazione; i modelli 3D personalizzati, poi, vengono prodotti direttamente con la tecnologia AM. In futuro, quindi, la varietà di prodotti può diventare potenzialmente infinita [79].

### **3.3 Limiti dell'AM**

Nonostante i numerosi vantaggi, alcuni limiti impediscono alla tecnologia di essere pienamente implementata. Come già anticipato precedentemente, i principali svantaggi del processo sono: le restrizioni sulle dimensioni, i tempi di produzione e i costi di acquisto di macchine e materiali.

Le stampanti 3-D sono in grado di realizzare solo oggetti di dimensioni inferiori a quelle delle macchine di produzione, ponendo dei limiti sui volumi delle parti che possono essere create. Sebbene esistano stampanti più grandi, queste devono essere collocate in luoghi in grado di contenere le loro dimensioni; senza una stampante abbastanza grande, le parti di un prodotto, in alcuni casi, vengono realizzate separatamente causando un aumento di tempo per la fase di assemblaggio [83]. Inoltre, la ristretta gamma di materiali limita la flessibilità di produzione [28].

Rispetto alle tecniche tradizionali, i processi di fabbricazione additiva sono relativamente lenti. Benché non esista tempo di attesa tra i cicli di produzione, il tempo totale di costruzione è superiore rispetto ai tempi di produzione dei processi convenzionali. Di conseguenza, a meno che non ci sia la possibilità di aumentare la velocità di stampa nel caso in cui sono richieste grandi quantità, la produzione convenzionale rimane il metodo più di costruzione preferito [83].

Il confronto dei costi diretti tra i processi additivi e sottrattivi descritto nel paragrafo precedente, ha evidenziato altri due limiti importanti: il costo delle attrezzature di stampa e

---

dei materiali. Tuttavia, il continuo sviluppo della tecnologia e l'ingresso nel settore di nuovi produttori porteranno a una riduzione dei prezzi e al superamento di questo limite [83].

I limiti relativi al prodotto sono: la presenza dei supporti e di imperfezioni. Nella maggior parte delle tecniche di fabbricazione additiva è necessario inserire strutture di supporto per poter realizzare l'oggetto, queste generano, nelle zone di contatto tra il supporto e il pezzo, una maggiore rugosità superficiale e la necessità di un processo di post trattamento per separare i due elementi [83].

Inoltre, nonostante la finitura superficiale e quindi la presenza di imperfezioni, varia al variare delle tecniche e delle macchine adottate; i risultati finali sono sempre inferiori a quelli ottenibili con le lavorazioni sottrattive; quindi se la finitura richiesta è particolarmente alta è necessaria una lavorazione successiva [83].

### **3.4 Standard dell'AM**

Un punto chiave che ostacola l'adozione delle tecniche di fabbricazione additiva per la realizzazione di parti finite è la mancanza di standard accettabili. Ad esempio, due produttori che utilizzano processi additivi, pur utilizzando la stessa attrezzatura e lo stesso materiale, potrebbero offrire agli utenti finali un prodotto con caratteristiche diverse sia in termini di proprietà meccaniche che di tolleranze geometriche e rugosità [84]. Inoltre, le parti prodotte con tecnologie additive hanno proprietà che possono essere molto diverse da quelle ottenute con la produzione sottrattiva, complicando la garanzia di qualità e la certificazione. In alcuni settori altamente regolamentati (medico, aerospaziale, automobilistico) questo problema può far ritardare e in alcuni casi impedire una più ampia adozione dell'AM.

Oltre alla qualità, un altro problema riguarda la ripetibilità dei processi. La produzione additiva è un processo complesso che richiede diverse fasi; ciascuna di queste deve essere monitorata, valutata e controllata per garantire la ripetibilità e l'affidabilità delle parti stampate; ciò permette di evitare un approccio basato su tentavi che causerebbe un aumento dei costi e degli errori. La standardizzazione è importante per definire i parametri per ogni fase della produzione AM, contribuendo a creare uno schema coerente per ogni fase del processo. In questo modo, un'azienda può confrontare la qualità dei suoi processi AM con una serie di criteri preliminari per raggiungere il risultato di qualità desiderato.

---

Di conseguenza, la possibilità di certificare la qualità delle parti realizzate e la garanzia di un processo ripetibile sono tra le principali sfide della produzione additiva [85].

L'interesse per gli standard AM è iniziato negli anni '90 quando la tecnologia era utilizzata principalmente per la produzione di prototipi formali e funzionali. Nel 1997 il *National Institute of Standard and Technology* (NIST) ha ospitato un workshop industriale intitolato "Measurements and Standards Issues in Rapid Prototyping". Lo scopo era quello di esaminare le opportunità e le sfide relative ai problemi di misurazione e allo sviluppo di standard [84]. Le aree proposte per gli standard di prototipazione rapida erano le seguenti:

- interfaccia dati da CAD ai sistemi RP (*rapid prototyping*): un formato alternativo per sopperire alle carenze dell'interfaccia STL
- valutazione delle prestazioni dei sistemi RP
- metodi per le misurazioni degli oggetti

Il NIST è un'agenzia governativa degli Stati Uniti che si occupa della gestione delle tecnologie. Fa parte del Dipartimento del Commercio e ha il compito di promuovere l'economia americana attraverso lo sviluppo di standard, tecnologie e metodologie che favoriscono la produzione e il commercio [86]. Il contributo dell'organizzazione nel campo della fabbricazione additiva è stato e continua ad essere fondamentale. Le varie ricerche, oltre a contribuire alla creazione di standard del settore, hanno aiutato lo sviluppo di tecniche di misurazione per le apparecchiature, l'ottimizzazione e controllo dei processi e la scoperta delle caratteristiche di vari materiali [87].

Aziende, centri di ricerca e università riconoscono da diversi anni la necessità di nuovi standard; per questo motivo sono state sviluppate diverse roadmap che hanno permesso di valutare le lacune e di concentrare gli sforzi della comunità scientifica sugli standard prioritari [84].

La *roadmap* pubblicata nel 2009, dall'Università del Texas si basa sul workshop che si è tenuto ad Alessandria il 31 marzo dello stesso anno; l'obiettivo del workshop era appunto quello di sviluppare una roadmap per indirizzare la ricerca nell'area della fabbricazione additiva per i prossimi 10-12 anni. La tabella di marcia identifica varie aree di alta priorità raggruppate nelle seguenti categorie [87]:

- ricerca
- istruzione e sensibilizzazione

- 
- sviluppo e comunità
  - centri nazionali certificati

Negli 2016, l'*American Makes* ovvero l'organizzazione statunitense per la ricerca e l'innovazione nel campo della fabbricazione additiva [88], ha iniziato una collaborazione con l'*American National Standards Institute* (ANSI), un'organizzazione privata, senza scopo di lucro; l'obiettivo è quello di sviluppare standard e specifiche per una rapida evoluzione industriale della FA. L'istituto che le due organizzazioni hanno creato, chiamato *American Makes and ANSI Additive Manufacturing Standardization Collaborative* (AMSC), ha pubblicato nel 2018 una roadmap: "*Standardization Roadmap for Additive Manufacturing (Version 2.0*") [89]; come riportato nel documento "la speranza è che la roadmap sarà ampiamente adottata dalla comunità degli standard e che faciliterà un approccio più coerente e coordinato allo sviluppo futuro di standard e specifiche per la produzione additiva" [90]. Il documento risulta essere completo, in quanto per determinare gli standard necessari è preso in considerazione l'intero ciclo di vita di una parte stampata in 3D, dalla progettazione e selezione dei materiali, al processo di produzione, la post-elaborazione, le proprietà del materiale finito, i test e anche manutenzione post-stampa.

Nel corso degli anni diversi enti nazionali di standardizzazione hanno sviluppato i propri standard; tuttavia gli sforzi più rilevanti in questo campo sono a livello internazionale. Le due principali organizzazioni sono l'*International Organization for Standardization* (ISO) e l'ASTM. La prima è la più importante organizzazione per lo sviluppo di norme tecniche; fornisce standard per prodotti e servizi contribuendo a rendere l'industria più efficiente ed efficace. La seconda, già citata in precedenza, è un leader, riconosciuto a livello mondiale, nello sviluppo e nella fornitura di standard internazionali [84].

Comprendendo la necessità di standard per guidare l'industrializzazione dei processi additivi, l'ASTM ha istituito nel 2009 il Comitato ASTM F42 per le tecnologie di produzione additiva. Nello stesso anno ha approvato l'"*F2792-12a Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*", ovvero il primo standard della fabbricazione additiva. Questo ha permesso di dare una definizione unica dell'AM. Il documento include, in aggiunta, definizioni e descrizioni di termini, nomenclature e acronimi delle tecnologie di fabbricazione additiva con l'obiettivo di standardizzare la terminologia utilizzata da produttori, ricercatori e media. La creazione di un lessico comune ha posto le basi per il

---

continuo sviluppo degli standard AM e ha assicurato che tutti nel campo potessero iniziare a parlare la stessa lingua [91].

Nel 2011 anche l'ISO ha istituito il Comitato ISO TC261 con l'obiettivo di fornire una standardizzazione dei processi, termini e definizioni, procedure di prova, parametri di qualità, contratti di fornitura e tipi di finanziamento. Nonostante i due comitati lavorino separatamente, nel 2013, hanno firmato un accordo per sviluppare congiuntamente standard accettati a livello globale. Questa collaborazione facilita lo scambio di tecnologie e prodotti finali tra i diversi Paesi e aziende, in quanto gli standard utilizzati sono gli stessi. Inoltre, permette di lavorare in maniera efficiente sfruttando le migliori risorse nel settore [92].

I due enti hanno creato una struttura comune per lo sviluppo delle norme sulla produzione additiva con lo scopo principale di ridurre il rischio di duplicazione del lavoro nonché di contraddizione tra i vari standard [84]. La struttura identifica una gerarchia delle norme e si estende su tre livelli:

1. standard generali (ad esempio concetti, requisiti comuni, guide, sicurezza)
2. norme per ampie categorie: di materiali (ad esempio polveri metalliche) o processi (ad esempio fusione a letto di polvere)
3. standard specializzati: per uno specifico materiale (ad esempio polveri di lega di alluminio), processo (ad esempio estrusione con ABS) o applicazione (ad esempio nel settore aerospaziale, medico o automobilistico) [93].

In Figura 20 è rappresentato uno schema della struttura appena descritta.

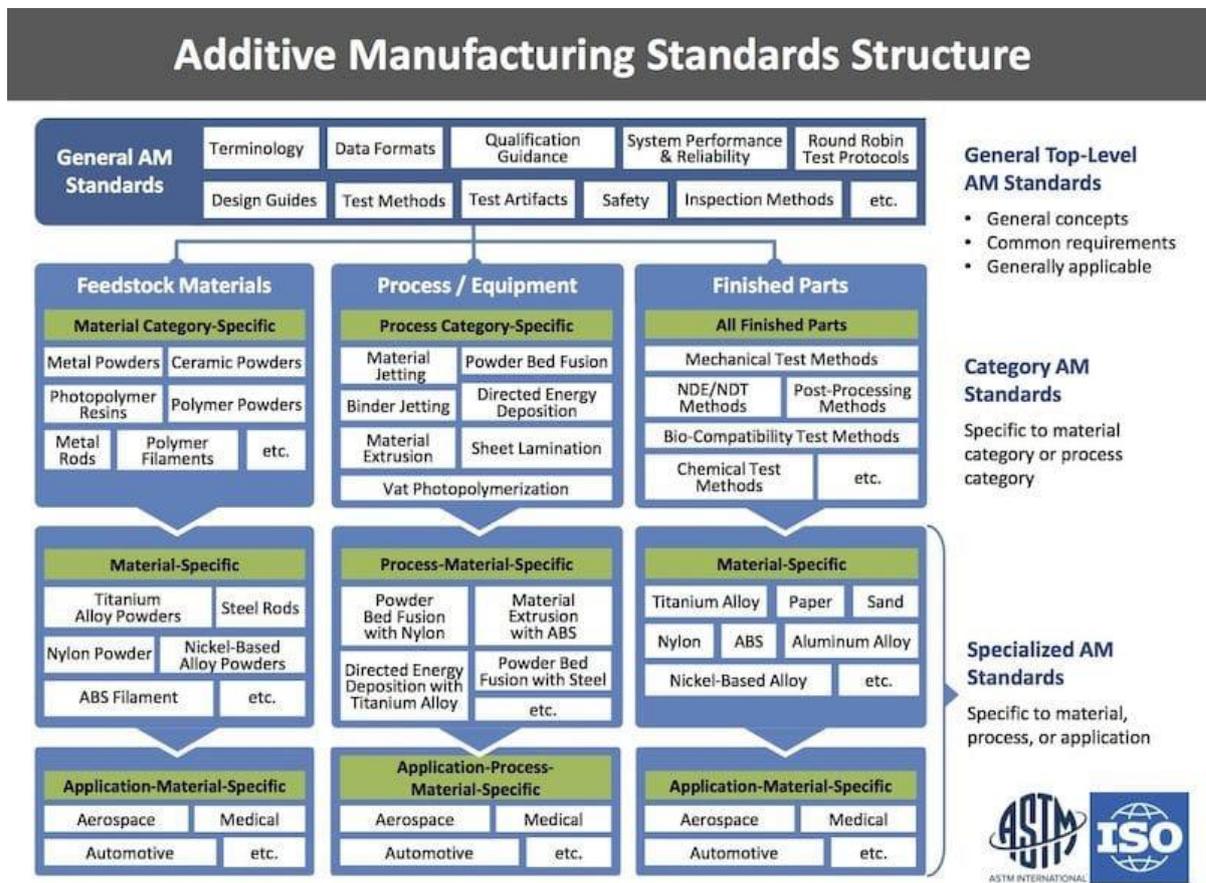


Figura 20: Struttura gerarchica concordata da ASTM e ISO per lo sviluppo futuro di standard per la produzione additiva [94]

La collaborazione ha permesso di coordinare gli sforzi globali per sviluppare e promuovere gli standard più richiesti dalla comunità AM sfruttando le competenze tecniche di oltre 1.000 esperti del settore. Grazie a questa cooperazione, ad oggi sono stati pubblicati circa 25 standard e altri 40 sono in fase di sviluppo. Questi includono:

- standard generali per AM
- standard per materie prime
- standard per il processo di fabbricazione additiva e per le apparecchiature
- standard per parti finite
- standard specifici delle applicazioni

---

Recentemente, al fine di soddisfare i requisiti dei diversi settori industriali, ASTM ha formato un nuovo sottocomitato per lo sviluppo di standard specifici per alcune applicazioni (ad esempio nel campo medico, trasporto / macchinari pesanti, marittimo). L'adozione di questi standard consentirà di certificare più velocemente la qualità dei prodotti realizzati [92].

---

## Capitolo 4 – I principali settori

Il continuo sviluppo della fabbricazione additiva ha consentito il suo utilizzo in diversi settori industriali, alcuni considerati inappropriati fino a pochi anni fa.

In aggiunta, gli attuali software di progettazione e le tecnologie di scansione 3D offrono una soluzione definitiva e integrata, permettendo di effettuare rapide operazioni di design e ingegnerizzazione per realizzare oggetti reali, prototipi estetici, funzionali e strutturali.

Di seguito è presente un elenco dei principali campi di applicazione.

### 4.1 Aerospaziale

L'applicazione dell'additive manufacturing in questo campo ha consentito la realizzazione di elementi più leggeri e di lunga durata, senza sacrificare le proprietà meccaniche dei componenti.

Le tecnologie AM basate sulla fusione consentono il controllo delle caratteristiche microstrutturali come, ad esempio, la struttura e la consistenza del grano e la manipolazione dei parametri di processo durante la fase di fabbricazione. Tale flessibilità permette di progettare e quindi produrre parti con caratteristiche complesse difficili da realizzare con processi tradizionali. Inoltre, la personalizzazione delle microstrutture è di fondamentale importanza per la costruzione di componenti aerospaziali ad alte prestazioni poiché spesso operano con condizioni ambientali non favorevoli: temperature elevate, condizioni meteorologiche avverse.

Se si considera l'aspetto economico, la fabbricazione additiva contribuisce alla riduzione degli ingenti costi di produzione associati ai componenti aerospaziali; che dipendono principalmente dall'elevato rapporto *buy-to-fly*, ovvero il rapporto di massa tra il materiale in ingresso e il prodotto finale. Per l'industria aerospaziale, nello specifico, questo rapporto

---

oscilla tra 10: 1 e 20: 1 ma, può raggiungere anche 40: 1 per componenti complessi. Poiché AM offre la possibilità di produrre oggetti con strutture reticolari, il rapporto *buy-to-fly* può essere notevolmente ridotto fino ad arrivare a 1:1. Di conseguenza, grazie al miglioramento delle microstrutture interne, al minore spreco di materiale associato e ai tempi di progettazioni più rapidi, la tecnologia additiva non è più vista come una semplice opzione di prototipazione ma come un metodo di produzione diretto in grado di produrre componenti di qualità elevata.

La *General Electric* (GE) è stata la prima azienda ad integrare diverse tecnologie di fabbricazione additiva per lo sviluppo di nuovi prodotti dei sistemi di propulsione degli aerei. Nel 2016, la società ha fondato, tramite l'acquisizione di società AM di alto profilo come *Concept Laser* e *Arcam*, una nuova filiale, *GE Additive*. Un'importante applicazione è stata la produzione di 19 ugelli in titanio da utilizzare nel motore commerciale "*Leading Edge Aviation Propulsion*" (LEAP). L'ugello presenta diversi vantaggi rispetto ai suoi predecessori, tra cui una durata cinque volte maggiore, telai più leggeri del 25% e un facilitato consolidamento delle parti. Inoltre, la sua costruzione avviene in un'unica operazione della macchina a differenza dei metodi sottrattivi attraverso i quali sono prodotti e assemblati venti componenti. La GE è anche riuscita a produrre in modo additivo un motore singolo turboelica per il velivolo *Cessna Denali* costituito solo da 12 parti assemblate, rispetto alle 855 chieste dalle tecniche sottrattive [95].

Nel 2017, un gruppo di ricerca presso il *Marshall Space Flight Center* (MSFC), appartenente alla NASA, ha contribuito allo sviluppo di una procedura di fabbricazione additiva per la produzione rapida di ugelli raffreddati in modo rigenerativo per applicazioni di motori a razzo [96].

Allo stesso modo, nel settore dell'industria aerospaziale privata, la *GKN Aerospace*, ha recentemente iniziato a produrre in modo additivo turbine a grandezza naturale per il motore *Prometheus*. Si prevede che questo sarà il primo sistema di propulsione a razzo a sfruttare pienamente la fabbricazione additiva.

Negli ultimi anni ci sono stati importanti passi in avanti nella produzione di componenti per i sistemi strutturali e di propulsione degli aerei. Una svolta in questo campo è avvenuta nel 2017, quando la società norvegese *Norsk Titanium* ha ricevuto l'approvazione dalla *Federal Aviation Administration* (FAA) per la fabbricazione di componenti, che sarebbero stati

---

sottoposti a carichi di stress durante il volo [95]. In seguito, nello stesso anno, Airbus iniziò la produzione di staffe in titanio da utilizzare all'interno dei A350 XWB [97].

Per quanto riguarda i veicoli spaziali, il primo utilizzo dell'AM per applicazioni strutturali è stato per la realizzazione di staffe di guida d'onda per la missione Juno del 201, prodotte utilizzando la tecnica EBM. Grazie ai numerosi vantaggi della tecnologia si prevede un suo ruolo più importante nella fabbricazione di componenti strutturali per i satelliti.



*Figura 21: Staffa guida d'onda per la missione Juno [95]*

Un ulteriore utilizzo dell'AM è nel campo della manutenzione e riparazione dei componenti degli aerei. Questi, infatti, possono subire un degrado a causa di condizioni ambientali e operative difficili. Tipicamente, le alte temperature delle tecniche convenzionali, come la saldatura, possono recare danni alla microstruttura dei componenti riparati. Inoltre, è spesso richiesta una post-elaborazione manuale che aumenta i tempi di consegna. Questi problemi rappresentano un valido motivo per la crescita, nel campo delle riparazioni, delle tecniche additive.

Attualmente, le riparazioni additive implicano la produzione ibrida, in cui l'approccio più comune è la sabbiatura e la successiva deposizione di polvere di metallo fuso sull'area danneggiata. La fase successiva è un processo di fresatura per rimuovere il materiale in eccesso. L'approccio ibrido è necessario per migliorare la finitura superficiale poiché le parti riparate hanno tipicamente una superficie ruvida, che potrebbe compromettere la loro resistenza. Le riparazioni tramite la fabbricazione additiva hanno due importanti vantaggi: la diminuzione dei costi di rifabbricazione (fino al 50% rispetto ai metodi classici) e una

---

significativa riduzione dei tempi di consegna. Ad oggi le riparazioni sono limitate alle strutture secondarie a causa della mancanza di certificazioni e standard da parte degli organismi di regolamentazione aerospaziale; tuttavia ci sono buone possibilità per l'applicazione dell'AM anche per le riparazioni delle strutture primarie [95].

La possibilità di costruire un oggetto tramite una sola macchina consente l'utilizzo di questa tecnologia anche in luoghi remoti. La NASA ha testato le tecniche additive senza gravità allo scopo di creare una macchina per la produzione nello spazio. Ciò consentirebbe agli astronauti di fabbricare componenti per la manutenzione e la riparazione della stazione spaziale internazionale limitando la necessità di effettuare viaggi per la consegna delle parti. Inoltre, favorirebbe missioni di equipaggio nello spazio profondo, poiché le parti potrebbero essere semplicemente prodotte sulla navetta. Avere la possibilità di stampare su richiesta riduce la quantità di spazio di carico necessaria e l'esigenza di pezzi di ricambio, aggirando così le restrizioni di peso sui veicoli spaziali [83].

## **4.2 Automobilistico**

Le tecniche di fabbricazione additiva sono implementate nel settore automobilistico da oltre 20 anni. Ad oggi, infatti, tutti i produttori di automobili utilizzano la prototipazione rapida, per ridurre il time to market e i costi di sviluppo prodotto. Nella realizzazione di un veicolo, alcuni componenti, ad esempio quelli di stile, possono rallentare il processo di progettazione e addirittura far ritardare il lancio della vettura sul mercato; le tecniche additive permettono la realizzazione di prototipi in tempi rapidi per eseguire test di forma, adattamento e funzionalità [98]. A differenza dei metodi di prototipazione tradizionale, alcuni processi additivi consentono di ottenere parti multicolore con una buona rugosità superficiale. Questi modelli aiutano il progettista a comprendere meglio la forma e l'adattamento del pezzo; inoltre, la buona qualità della finitura superficiale permette di effettuare accurate prove aerodinamiche [99].

Tuttavia, l'uso delle stampanti 3D per la creazione di prototipi è solo uno dei tanti utilizzi nel settore. Di seguito sono indicate le altre applicazioni.

1. Creazione di stampi: si ha la possibilità di realizzare stampi in tempi rapidi e a basso costo, necessari per la produzione di lotti di piccole e medie dimensioni [99].

- 
2. Produzione di utensili: molte aziende utilizzano ormai da tempo le stampanti 3D per realizzare tutti strumenti necessari nei cicli di produzione [100].
  3. Produzione di parti finali: i continui progressi della tecnologia e dei materiali hanno permesso il suo utilizzo per la produzione di componenti finali di piccole e medie dimensioni. Il circuito della Formula 1 è stato un pioniere nell'implementazione della stampa 3d per la realizzazione di parti (anche strutturali) delle auto da corsa [101].
  4. Produzione dei ricambi per auto: grazie ai vantaggi della stampa 3D il mercato dei pezzi di ricambio può essere completamente rivoluzionato. I costruttori di veicoli, infatti, devono garantire una vasta rete di distribuzione; le parti devono essere sempre reperibili, in tempi rapidi, in tutti i paesi in cui le aziende commercializzano i propri prodotti [102]. Ciò comporta, per le aziende, elevati costi di stoccaggio; la fabbricazione additiva permette la produzione della parte richiesta solo quando necessario riducendo così i costi di inventario, i tempi di consegna e migliorando la catena di fornitura [99]. Inoltre, attraverso l'integrazione con la *reverse engineering*, offre anche la possibilità di produrre componenti per cui non si hanno a disposizione i disegni tecnici [102].

Come nel campo aereo spaziale, anche nel settore automobilistico, la libertà progettuale e la possibilità di creare strutture più leggere, hanno incentivato le case automobilistiche ad investire in questa tecnologia. Quest'anno, ad esempio, *BMW* ha inaugurato un nuovo Campus per la produzione additiva. La nuova struttura, per la quale l'azienda ha investito 15 milioni di euro, sarà utilizzata per la produzione di prototipi, di parti in serie e per la ricerca tecnologica. L'obiettivo principale del gruppo è quello di rendere più efficiente la produzione in serie dei componenti, per poterli integrare anche nei veicoli con volumi di vendita elevati [103].

Un altro esempio dei continui progressi nel settore è la collaborazione tra l'azienda torinese *XEV*, specializzata nella produzione di veicoli elettrici, e l'azienda cinese *Polymaker*, leader nel settore della fabbricazione additiva, che ha permesso la produzione e la vendita di auto realizzate interamente tramite una stampante 3D [104](Figura 22).



Figura 22: Modello di auto XEV [105]

### 4.3 Medico

Il campo medico è stato il primo utilizzatore della stampa 3D. Le tecniche additive e l'integrazione con i sistemi di *reverse engineering*, come la tomografia computerizzata (TC) e la risonanza magnetica (MRI), permettono la realizzazione di parti personalizzate che corrispondono all'anatomia del paziente.

La produzione di modelli reali di qualsiasi forma anatomica ha consentito alla tecnologia di assumere un ruolo chiave in diverse applicazioni biomediche [106].

1. Pianificazione preparatoria: la possibilità di pianificare al meglio un intervento limita il tempo necessario per l'intervento stesso e può ridurre la probabilità di complicazioni, nonché di degenze post-operatorie. La tecnologia permette la realizzazione di un modello fisico 3D che aiuta il chirurgo a comprendere chiaramente la situazione clinica e a pianificare accuratamente l'approccio chirurgico basandosi appunto sull'anatomia specifica del paziente [107].
2. Realizzazione protesi: i processi additivi permettono di creare protesi personalizzate a costi e tempi ridotti rispetto ai processi tradizionali. Ad oggi, ad esempio, è possibile effettuare una cranioplastica personalizzata con parti stampate tramite tecnologie 3D realizzate partendo dalle immagini tomografiche [108]. In Figura 23 è mostrata una fase della progettazione della protesi cranica.

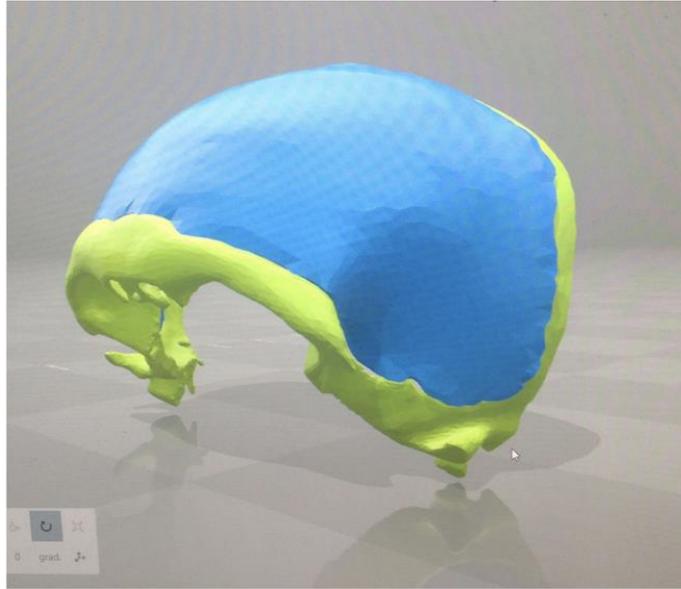


Figura 23: Design digitale della protesi personalizzata [108]

3. Produzione di farmaci: la tecnologia si sta propagando nel settore farmaceutico per la realizzazione di medicinali personalizzati in base alla quantità necessaria ad ogni persona. *Spiritam* (utilizzato per l'epilessia), il primo farmaco approvato dalla *Food and Drug Administration* (FDA), è stato realizzato tramite una stampante a getto d'inchiostro. Nonostante sia ancora l'unico in commercio, sono iniziate diverse ricerche per produzioni di altri medicinali tramite tecniche additive come la SLA e la FDM [109].
4. Produzione di dispositivi medici: la creazione degli strumenti sanitari può avere un grosso impatto nel settore. Un esempio di questa applicazione è produzione di un kit chirurgico composto da: un retrattore, una pinza emostatica, una pinza per tessuti, un divaricatore, dei manici per bisturi e delle guide per aghi; la realizzazione ha richiesto circa sei ore [109].
5. Miglioramento della formazione medica: la possibilità di avere modelli specifici del paziente favorisce l'apprendimento migliorando in modo significativo la conoscenza; si ha la possibilità di modellare diverse anatomie fisiologiche e patologiche partendo da un enorme set di dati di immagini. Inoltre, consente la condivisione dei modelli tra diverse istituzioni [107].
6. Biostampa: un'applicazione che potrebbe rivoluzionare il campo medico è la creazione di tessuti e organi da impiantare direttamente nel corpo umano. Il processo

---

non è molto diverso da quello delle stampanti 3D tradizionali; la differenza sostanziale è nei materiali che vengono utilizzati. Per gli organi più semplici o per strutture cartilaginee come le orecchie o la trachea, vengono utilizzate delle impalcature disegnate in CAD e stampate in 3D usando materiali biocompatibili, sulle quali vengono depositate le cellule per formare tessuti e organo. Per gli organi più complessi, al contrario, vengono depositati strati di cellule unite tramite un gel e materiali biodegradabili. Il materiale utilizzato, in gergo definito “bioinchiostro”, è un Idrogel costituito principalmente da acqua e cellule vive, mescolate con agenti solidificanti, che passano allo stato solido grazie all’esposizione della luce ultravioletta. Successivamente, a seguito dell’impianto, le cellule si modificano rendendo la struttura autosufficiente e i materiali di supporto si degradano. Numerosi esperimenti sono stati compiuti in questo ambito, si prevede che nel futuro la biostampa possa rivoluzionare in modo significativo il campo medico [110].

## 4.5 Alimentare

Le principali motivazioni nell’utilizzo della stampa 3D nel settore alimentare sono la possibilità di personalizzazione gli alimenti, di creare forme complesse e di ridurre i costi per le produzioni su richiesta [111]. Attraverso la tecnologia additiva è possibile realizzare oggetti geometricamente complessi che difficilmente un artigiano potrebbe realizzare manualmente. Uno dei tanti vantaggi è la possibilità di personalizzare un alimento: i cibi possono essere adattati in base alle richieste dell’individuo considerando il suo stato di salute, l’età anagrafica nonché i suoi gusti personali. È possibile, perciò, scegliere il contenuto calorico, i nutrienti e anche le dimensioni delle porzioni che verranno prodotti automaticamente dalle stampanti 3D. Ciò permette di creare una dieta sana e adatta alle esigenze del singolo.

Molte organizzazioni e aziende hanno mostrato interesse per l’introduzione della tecnologia in questo campo. *Stratasys* e *3D Systems*, due tra le più grandi società nel campo della fabbricazione additiva, hanno entrambe dichiarato l’intenzione di sviluppare stampanti ad uso commerciale per la creazione di cioccolato (la prima ha già depositato brevetti sui processi) [111]. Un ulteriore esempio è la stampante *Candy Factory*, utilizzata dall’azienda tedesca *Katjes* per la creazione di caramelle gommose. La società offre ai clienti la possibilità

---

di scegliere gli ingredienti e la forma dei propri dolci. Le stampanti 3D sono all'interno dei negozi permettendo ai consumatori di vedere come le loro creazioni vengono realizzate [112].

Anche Barilla, in collaborazione con il centro di ricerca olandese TNO (Organizzazione Olandese per la Ricerca Scientifica Applicata), sta lavorando da diversi anni sullo stampaggio della pasta. Nel 2015, è stato realizzato un primo prototipo della tecnologia in grado di stampare pasta fresca in due minuti [113]. Oggi, l'azienda multinazionale italiana è riuscita a concretizzare il progetto iniziando a vendere, tramite un sito e-commerce, pasta stampata in 3D. Attraverso il nuovo brand *Blurhapsody*, la società offre differenti formati di pasta dal design innovativo (Figura 24), ideati in alcuni casi da importanti chef [114].



Figura 24: Esempi di formati di pasta Barilla realizzati tramite stampa 3D [115]

L'esplorazione di materiali commestibili che hanno proprietà di stampabilità, può contribuire all'espansione della tecnologia nel settore. Con il termine stampabilità si fa riferimento a tutte le proprietà che consentono al materiale di essere maneggiato con stabilità e di sostenere il proprio peso. Inoltre, le strutture dei materiali per la stampa alimentare devono essere resistenti alla cottura. Attualmente le materie prime utilizzate nei processi includono zucchero, cioccolato, formaggio, cereali, pasta per biscotti e carne macinata [116].

---

Recentemente ha riscosso interesse l'utilizzo di ingredienti alternativi come alghe, funghi e persino insetti; questi, infatti, oltre ad essere materiali eco-compatibili, sono a ricco contenuto di fibre e proteine [117].

Inoltre, la NASA ha finanziato un progetto per lo sviluppo di un sintetizzatore in grado di produrre cibo commestibile; l'obiettivo della ricerca è quello di fornire questa tecnologia agli astronauti che dovranno compiere i primi viaggi su Marte [118].

## 4.6 Arte

Già da tempo la tecnologia digitale è utilizzata nel campo dell'arte per catalogare, preservare e condividere il patrimonio artistico dei diversi Paesi [119]. La fabbricazione additiva ha permesso di compiere uno *step* successivo. Le stampanti 3D consentono, infatti, di ricreare oggetti antichi e opere d'arte fedeli all'originale, visibili occasionalmente per poterli preservare, dando la possibilità ai musei di esporre al pubblico manufatti rari o fragili [120]. Facendo riferimento alla collezione del *British Museum*, che comprende circa otto milioni di oggetti, solo l'1% sono esposti al pubblico in qualsiasi momento. Attraverso la scansione digitale e la riproduzione fedele delle opere, i musei stanno cercando di condividere maggiormente le proprie collezioni [121]. La possibilità di ricreare i manufatti potrebbe rivoluzionare il concetto tradizionale di visita: non è necessario tenere le repliche in teche e mettere delle barriere, ma il pubblico potrebbe avvicinarsi e persino toccarle, permettendo un'esperienza interattiva. Inoltre, la stampa 3D consente la sostituzione delle opere d'arte nel caso in cui dovessero essere sottoposte a manutenzione, limitando così la riduzione del numero di visitatori [120].

La combinazione delle tecniche AM e di scansione digitale ha consentito, inoltre, di poter restaurare e ricostruire opere in tutto il mondo. Negli ultimi anni, sono state ricreate alcune delle opere d'arte distrutte dall'ISIS, incluso l'Arco di Trionfo di Palmyra. Un altro esempio sono le opere restaurate a seguito dell'incendio nel museo nazionale del Brasile che, nel 2018, ha distrutto 20 milioni di reperti [120].

Oltre alla ricostruzione di reperti recentemente distrutti, è possibile utilizzare la stampa 3D per ricreare opere dell'antichità. Un esempio è la realizzazione della statua di Zeus ad

---

Olimpia, ottenuta grazie alla collaborazione tra *il Millennium Gate Museum*, il *3DCenter* della *Kennesaw State University* e *Stratasys* [122].

*Il Metropolitan Museum of Art* e il *British Museum* hanno utilizzato l'AM per realizzare i souvenir disponibili nei loro negozi; mentre, altri musei, hanno iniziato a vendere, tramite una piattaforma online, i modelli digitali dei loro manufatti, offrendo a tutti la possibilità di stampare le opere [123].



*Figura 25: Ricostruzione 3D della Statua di Zeus ad Olimpia [124]*

Inoltre, è utilizzata come strumento e simbolo di una nuova corrente artistica [125]. Di seguito sono mostrate alcune sculture realizzate con tecniche di fabbricazione additiva.



*Figura 26: Scultura di Michael Winstone [126]*



*Figura 27: Scultura di Bathsheba [127]*



*Figura 28: Scultura di Joshua Harker [128]*

## **4.7 Moda**

Uno dei settori più competitivi è sicuramente quello della moda. I grandi brand, infatti, devono rinnovarsi continuamente per mantenere o raggiungere un vantaggio competitivo nel mercato. Negli anni, i desideri dei consumatori sono cambiati: si è passati dalla produzione di massa a quella che viene definita “*mass-customization*” ovvero personalizzazione di massa. Questo ha costretto le aziende ad utilizzare tecnologie sempre più innovative (come ad esempio la stampa digitale) per adattare i prodotti alle specifiche dei clienti. Il livello di personalizzazione richiesto è sempre in aumento, si preferisce acquistare un pezzo unico

---

piuttosto che un capo standard a cui si è aggiunto qualche dettaglio. Questo è il principale motivo per cui anche nell'industria della moda si è iniziato a parlare di fabbricazione additiva. Le stampanti 3D, infatti, permettono di realizzare pezzi unici a costi inferiori rispetto alle tecniche tradizionali. Nel 2007, il professore Guy Bingham è stato il primo a realizzare un capo attraverso un sistema SLS impiegando due mesi per il completamento. Da allora numerosi stilisti utilizzano l'AM per creare abiti dal design originale [129]. Lo stilista Zac Posen, per creare una collezione ispirata alla natura, ha dovuto abbandonare l'idea di lavorare con il tessuto per passare all'utilizzo delle tecniche additive. La realizzazione è stata possibile grazie alla collaborazione con *GE Additive*, che ha ingegnerizzato le sue idee stilista. Di seguito è mostrato un modello della collezione [130].



*Figura 29: Abito realizzato da Zac Posen [131]*

Tuttavia, ad eccezione del settore dell'alta moda, la tecnologia non è ancora utilizzata per i capi di largo consumo. Il problema principale è il materiale che si utilizza. Sebbene la stampa 3D dei tessuti stia facendo importanti passi in avanti, la materia prima adoperata non possiede le proprietà tessili essenziali quali morbidezza, flessibilità, resistenza e porosità [132]. L'AM, infatti, viene utilizzata solo negli indumenti in cui si combinano parti solide e morbide [133].

Il potenziale di crescita nel settore della calzatura è sicuramente maggiore; aziende multinazionali sfruttano già la tecnologia per la produzione di soles. *Adidas*, una delle più

---

importanti aziende nel campo sportivo, ha lanciato una gamma speciale di scarpe da corsa in grado di adattarsi al piede di ogni atleta, attraverso la stampa 3D di una suola personalizzata. In relazione a questo progetto, Eric Liedtke ha dichiarato: “Abbiamo utilizzato in modo completamente nuovo una combinazione fra materiale e processi produttivi unica nel suo genere. La nostra intersuola stampata in 3D non solo ci permette di realizzare una grande scarpa da *running*, ma anche di utilizzare i dati delle prestazioni per consentire un’esperienza veramente su misura soddisfacendo le esigenze di ogni atleta” [134].

## 4.8 Gioielleria

Come nel campo della moda, anche nell’industria dei gioielli, la personalizzazione dei prodotti offerti sul mercato gioca un ruolo di primo ordine. Attualmente gran parte della produzione avviene tramite processi di microfusione a cera persa che sono ideali per la produzione in serie, ma presentano limiti importanti se utilizzati per piccole produzioni altamente personalizzate. Per le tecniche convenzionali, come detto precedentemente, esiste una correlazione positiva tra la complessità della parte e il suo costo di produzione; l’AM offre, al contrario, la possibilità di realizzare forme complesse senza incidere sul costo totale. In aggiunta, i designer di gioielli possono realizzare qualsiasi forma senza preoccuparsi dei vincoli di produzione [135].

Uno studio condotto da alcuni ricercatori del Politecnico di Leiria ha evidenziato ulteriori vantaggi dell’utilizzo della fabbricazione additiva, e nel caso specifico della tecnica di fusione a letto di polvere per metalli, rispetto ai processi di microfusione. I risultati della ricerca hanno mostrato ulteriori vincoli di progettazione dei processi convenzionali che non dipendono solo dalla complessità geometrica delle parti, ma dal materiale utilizzato, dalla lunghezza del percorso del metallo fuso nello stampo e dallo spessore della geometria. Per quanto riguarda la sostenibilità ambientale, con la fusione del letto di polvere si è prodotto il 30% di materiale di scarto (necessario per la creazione dei supporti). Con la fusione a cera persa, invece, il materiale in eccesso corrisponde al 60% del totale lavorato [136].

In conclusione, la fabbricazione additiva consente di creare oggetti innovativi ottenendo migliori livelli di qualità a costi inferiori rispetto alle tecniche convenzionali [136],

---

permettendo alle aziende di rimanere competitive sul mercato. Tuttavia, nell'industria dei gioielli, il limite principale è di natura culturale; molti produttori, infatti, realizzano gli oggetti a mano per mantenere un livello alto di autenticità e unicità. Altri ancora, sono restii ad apprendere nuove competenze specifiche per sfruttare a pieno tutti i vantaggi della stampa 3D [137].

## 4.9 Edilizia e architettura

In campo edilizio e architettonico la tecnologia 3D è già ampiamente utilizzata per la creazione di modelli di edifici e plastici. L'obiettivo, però, è sicuramente più ambizioso: realizzare veri e propri edifici [138]. Negli ultimi anni diversi architetti e ingegneri hanno già creato case in 3D; nell'agosto del 2014, ad esempio, la società cinese *WinSun Decoration Design Engineering* ha costruito 10 case in un solo giorno. Per il progetto è stata impiegata una stampante lunga 500 metri, larga 33 e profonda 20; il materiale utilizzato, è un calcestruzzo speciale realizzato con rifiuti riciclati, rifiuti da costruzione e fibre di vetro [139].

La stampa 3D nell'edilizia consente di risolvere molti problemi del settore: la sicurezza dei lavoratori, l'elevata quantità di scarti di costruzione, la ridotta disponibilità di forza lavoro qualificato. È possibile, infatti, ridurre l'esposizione dei lavoratori ad ambienti difficili (con temperature elevate o estremamente fredde) grazie all'automazione di alcune attività [140]. Inoltre, molte aziende, tra cui *WASP*, società italiana, leader del settore delle stampanti 3D, stanno progettando la costruzione di edifici con materiali reperiti sul luogo di costruzione, consentendo non solo di ottenere strutture eco-sostenibili, ma anche di ridurre notevolmente i costi [141].

Un ulteriore vantaggio è la riduzione del tempo di fabbricazione; una dimostrazione, oltre a quella citata precedentemente, è l'edificio per uffici di Dubai costruito in soli 17 giorni. Il progetto è in realtà un complesso di edifici interconnessi, ciascuno costituito da più componenti in calcestruzzo, fabbricati in una fabbrica di Shanghai e assemblati successivamente. La velocità di costruzione e i risparmi sui costi e sulla manodopera sono i punti chiave per il successo e il continuo sviluppo della tecnologia nel settore. In effetti, il nuovo edificio è costato solo 140.000\$. La stampa 3D, inoltre, consente di ridurre i costi di

---

manodopera dal 50% all'80% e ridurre i rifiuti di costruzione dal 30% al 60%. La struttura di Dubai, infatti, ha richiesto un team di soli 18 esperti: uno per monitorare la funzione della stampante; sette operai per installare i componenti dell'edificio in loco e 10 elettricisti [142].

I processi additivi, di conseguenza, potrebbero fornire rapide soluzioni abitative nei Paesi sottosviluppati e in casi di emergenza.

Tuttavia, nonostante i numerosi traguardi già raggiunti, sono necessari importanti progressi affinché le costruzioni in campo edile possano essere commercializzate. Sebbene i processi di fabbricazione additiva siano stati migliorati per adattarsi ai requisiti di costruzione, rimane la necessità di sviluppare materiali che possano sostituire i materiali convenzionali. Questi devono possedere le proprietà adatte per garantire la stabilità e la resistenza nel tempo [143].

---

## Capitolo 5 – Impatto sulla Supply Chain

### 5.1 Semplificazione della Supply Chain

Uno degli obiettivi principali delle aziende è la semplificazione della Supply Chain. Una catena di fornitura più snella ha un valore strategico per le aziende; permette, infatti, di ottenere una maggiore produttività, un incremento dei profitti e un rapido recupero finanziario. Produttori, rivenditori e distributori sono sempre alla ricerca di innovazioni per rendere più efficienti le proprie catene di approvvigionamento. Tra le varie tecnologie dell'industria 4.0, l'implementazione della fabbricazione additiva consente di semplificare la catena di fornitura aumentando l'efficienza e la reattività nell'adempimento della domanda. Negli ultimi anni sono stati sviluppati diversi concetti di Supply Chain; di seguito è descritto come la FA permette di applicarli praticamente, garantendo la creazione di valore all'interno della catena di fornitura.

- *Lean Supply Chain*: il principio fondamentale dell'approccio *lean* è la riduzione dei costi e degli sprechi al fine di investire solo sulle attività che generano valore per i clienti. L'obiettivo è la gestione della produzione secondo la logica Pull ovvero l'implementazione del processo produttivo solo in seguito a una richiesta da parte del mercato.

Poiché la fabbricazione additiva consente la produzione di un oggetto attraverso un unico processo, la sua applicazione permette di eliminare i magazzini dei semilavorati (WIP). Inoltre, l'integrazione con altre tecnologie dell'industria 4.0 consentirà alle aziende una produzione *Just-in-Time* rispetto alla sola gestione del magazzino *Just-in-Time*. Non si avrà più la necessità di avere magazzini di prodotti finiti nonché di materie prime, dal momento che l'unico stock necessario è il disegno CAD degli oggetti da realizzare. La riprogettazione dei prodotti con un numero

---

minore di componenti fornisce, in aggiunta, ulteriore risparmio sui costi di approvvigionamento di parti e componenti non realizzate internamente. In più, poiché non richiede cambi di utensili per la lavorazione di parti e prodotti diversi, permette di ridurre i tempi di settaggio delle macchine [10].

- *Agile Supply Chain*: nel caso in cui l'azienda operi in mercati turbolenti, caratterizzati da una domanda variabile, e realizzi prodotti dal ciclo di vita sempre più breve, l'approccio *lean* non è efficace per raggiungere un vantaggio competitivo. In queste condizioni, infatti, non è sufficiente concentrarsi sull'efficienza (riducendo costi e sprechi) ma, è necessario aumentare la flessibilità del sistema.

Nell'approccio *agile*, a differenza del precedente, la riduzione del *lead time* e degli sprechi diventa una condizione necessaria ma non sufficiente per creare valore.

La flessibilità produttiva della fabbricazione additiva permette una rapida riconfigurazione dei prodotti e dei processi sia in termini di quantità che di progettazione per soddisfare la mutevole domanda dei consumatori. La FA consente di spostare all'interno della catena di fornitura il punto di disaccoppiamento dell'ordine (il punto in cui il cliente è legato al prodotto) più vicino al cliente aumentando in modo significativo la flessibilità del *Supply Chain*. In pratica, l'azienda potrebbe produrre secondo una logica *make-to-order* in cui il cliente determina la produzione non solo in termini di volumi ma anche di caratteristiche di prodotto [10].

- *Mass customization*: come detto in precedenza, in molti settori la possibilità di personalizzare i prodotti è essenziale per poter sopravvivere nel mercato. Ad oggi, le aziende realizzano oggetti specifici per ogni cliente attraverso l'utilizzo di diverse combinazioni di parti modulari. La società Dell, ad esempio, personalizza i computer, assemblando diverse combinazioni di schede video, microprocessori, dischi rigidi secondo le esigenze specifiche del cliente.

La fabbricazione additiva garantisce tutti i vantaggi della personalizzazione di massa, ovvero: produzione di pezzi relativamente bassi, riduzione del rischio di inventario (i prodotti vengono realizzati solo dopo che gli ordini sono stati ricevuti) e migliore gestione del capitale circolante (il pagamento avviene prima della produzione), limitando, però, gli svantaggi che ne derivano. La personalizzazione di massa, infatti, necessita di una Supply Chain altamente integrata, in quanto i componenti utilizzati

---

per la realizzazione dei prodotti provengono da fornitori diversi; al contrario, la fabbricazione additiva utilizza materiali di consumo acquistabili da più fornitori. Inoltre, rispetto al primo che si basa su un lavoro di team, la stampa 3D è più facile da gestire in quanto è un processo automatico che necessita solo di un file CAD [144].

## **5.2 Come introdurre l'AM all'interno della Supply Chain**

Molte tecniche innovative sono introdotte con modelli di business già esistenti, tuttavia, nel caso si implementi una tecnologia dirompente, è necessario rimodellare o addirittura reinventare il modello di business aziendale. Nel caso specifico della fabbricazione additiva, la sua introduzione implica il passaggio da una logica incentrata sul produttore a una incentrata sul consumatore [145]. L'utilizzo delle tecniche additive non solo influenza il coinvolgimento del cliente nella fase di progettazione, ma offre l'opportunità di avere strutture decentralizzate situate vicino ai consumatori. Le aziende, quindi, in base alle loro esigenze, alle caratteristiche del prodotto offerto e del mercato in cui operano, hanno la possibilità di integrare la tecnologia additiva in modo centralizzato o decentralizzato all'interno della propria Supply Chain.

L'utilizzo dell'AM in un sistema centralizzato implica la realizzazione dei prodotti in una sede centrale e la successiva spedizione nei vari centri di distribuzione. Sebbene questo approccio non permetta la riduzione dei tempi di trasporto, consente l'aggregazione della domanda, proveniente dai vari centri, affinché l'investimento nella capacità delle macchine AM sia utilizzato in modo efficiente. L'approccio centralizzato è opportuno quando la quantità domandata sul mercato è limitata e il *lead time* non è un fattore critico (Figura 30).

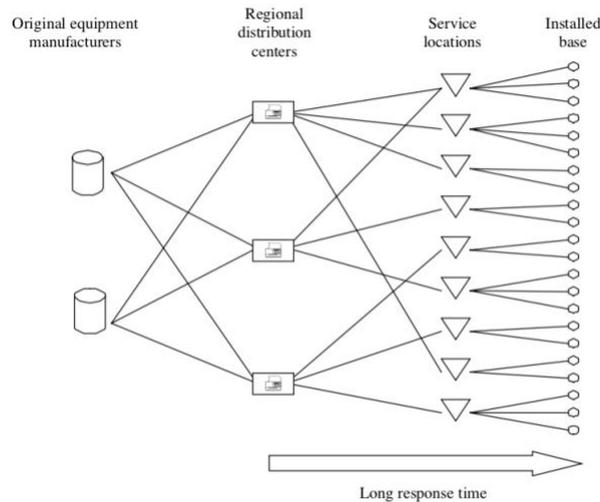


Figura 30: AM centralizzato [146]

Al contrario, nell'AM distribuito la produzione avviene in ogni centro di distribuzione consentendo l'eliminazione dei costi di stoccaggio, la riduzione dei costi di trasporto e un tempo di risposta più rapido [147]. Barz et al. hanno condotto uno studio computazionale sull'impatto della fabbricazione additiva sui costi di trasporto. La loro ricerca ha evidenziato che l'introduzione della tecnologia e il nuovo riposizionamento dei siti di produzione comporta una riduzione dei costi di trasporto da un minimo del 43% a un massimo del 58% [148] (Figura 31).

Inoltre, la realizzazione di pochi prodotti in più stabilimenti consente di avere una catena di fornitura meno vulnerabile ai disastri e alle interruzioni; l'impatto, infatti, non è più nazionale o regionale ma localizzato nella singola sede di servizio [149].

La produzione decentralizzata, in aggiunta, permette alle aziende di esplorare i diversi mercati in cui i centri di distribuzioni/produzione sono situati, adattando così la produzione a questi. Tuttavia, la sua implementazione necessita di elevati investimenti in macchine 3D e in personale specializzato giustificati solo in caso di una domanda sufficientemente alta.

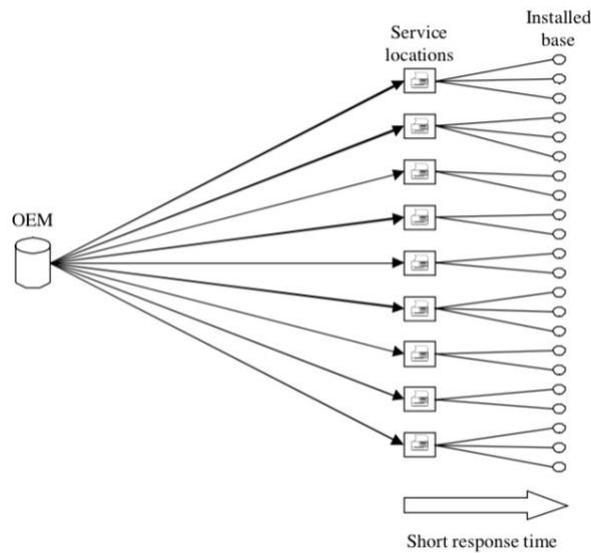


Figura 31: AM distribuito [146]

### 5.3 Outsourcing e produzione utente

In generale, la catena di fornitura può essere suddivisa in tre livelli principali: upstream, midstream e downstream. Upstream sono i fornitori e i produttori, il midstream include i processi di trasporto e di magazzinaggio, mentre il downstream comprende i rivenditori e la distribuzione ai clienti finali. Inoltre, è possibile identificare cinque tipi di flussi che interconnettono fornitori, produttori, grossisti, rivenditori e consumatori: flussi di prodotti, flussi di processo, flussi di informazioni, flussi finanziari, nonché flussi di energia e risorse naturali.

La Figura 32 mostra due possibili riconfigurazioni della Supply Chain appena descritta. In primo luogo, è illustrata una catena di fornitura tradizionale, successivamente è mostrato un modello di AM centralizzato e infine è presentato un modello di riconfigurazione della rete decentralizzata.

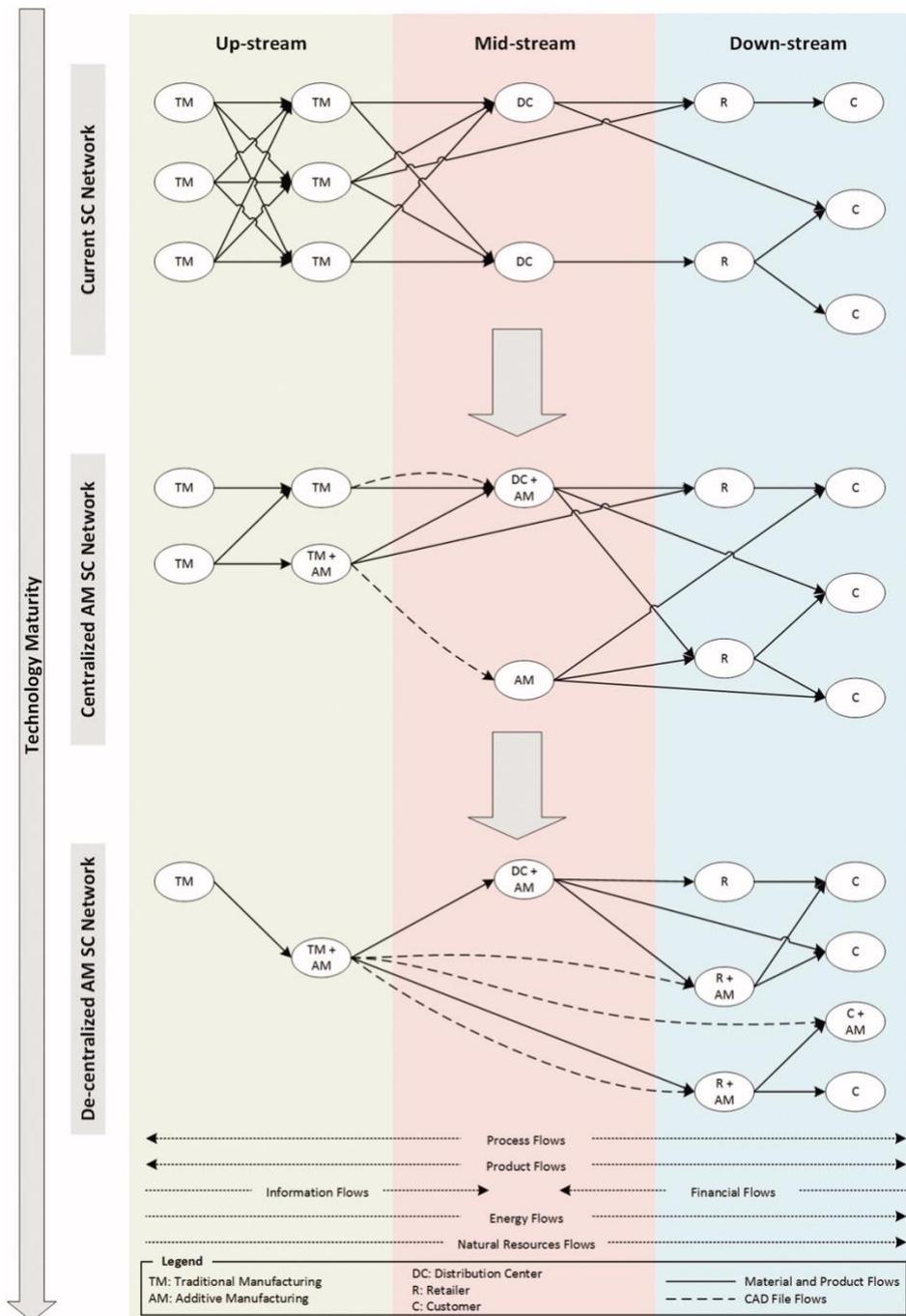


Figura 32: Esempi di riconfigurazione della Supply Chain [150]

Nel primo modello di riconfigurazione, le macchine 3D sono installate in posizioni centralizzate nei livelli upstream e midstream. In particolare, queste sono utilizzate sia da produttori di apparecchiature originali che da fornitori di pezzi di ricambio [150]; si utilizza un approccio ibrido: la fabbricazione additiva non è un sostituto della produzione tradizionale ma un complemento. Inoltre, i flussi di prodotto sono sostituiti con flussi digitali

---

(si trasferisce sono il file CAD e non l'oggetto fisico) [150]. La produzione centralizzata, infatti, permette l'integrazione con il canale e-commerce. Attraverso la FA è possibile implementare la tele-produzione che consente ai clienti di creare i propri prodotti e di trasferire i file in un unico luogo per la fabbricazione; ciò facilita il rapporto tra cliente finale e organizzazione senza la necessità di intermediari quali i rivenditori del canale [151].

Nel secondo modello di riconfigurazione, ipotizzando che i futuri miglioramenti tecnologici e l'uso diffuso dell'AM ridurranno il costo di queste tecnologie, i macchinari sono installati in luoghi distribuiti. Una quota significativa della produzione avviene a valle della Supply Chain, mentre i file digitali sostituiscono ulteriormente i flussi di prodotto dai livelli superiori a quello inferiore. Ciò porta a reti di fornitura più brevi e meno complesse, minori esigenze di trasporto e tempi di consegna ridotti [150].

La produzione decentralizzata porterà nel caso estremo alla produzione utente. Questo modello ipotetico ha il potenziale di influenzare in modo significativo la catena di fornitura. I consumatori non acquisteranno più i prodotti fisici dalle aziende, ma solo i file CAD che saranno autoprodotti tramite tecnologie situate nelle loro case [151]. Inoltre, si diffonderà il modello di business *customer-to-customer* (C2C) attraverso il quale i clienti acquisteranno i prodotti da altri clienti (definiti *promuser*) diffondendo così una produzione senza produttori.

Un altro sviluppo futuro è la possibilità da parte delle imprese di attuare maggiormente una strategia di *outsourcing*. Poiché nell'AM la progettazione e la produzione sono facilmente separabili, le aziende possono affidare a società come *Shapeways* e *3Hubs* le fasi di produzione e consegna, focalizzandosi solo sull'ideazione del prodotto [144]. L'*outsourcing* consente di accedere alla tecnologia senza gli elevati costi di investimento del capitale; abbassando così le barriere all'ingresso per gli imprenditori. In aggiunta, la disponibilità di questi servizi offre vantaggi in termini di sostenibilità grazie a un maggiore utilizzo delle apparecchiature.

In alternativa, le imprese possono integrare la FA grazie all'affitto o alla condivisione dei macchinari con altre società (produzione collaborativa).

Tuttavia, tali modifiche alla struttura delle catene di fornitura saranno lente, in quanto è necessario l'impegno da parte delle aziende nel riprogettare sia i prodotti che i processi per semplificare la loro Supply Chain e modificare il loro ruolo al suo interno [151].

---

## 5.4 Cambiamenti organizzativi

L'introduzione delle tecniche di fabbricazione additiva richiede a progettisti e ingegneri la modifica dell'intero flusso produttivo [152]. In Figura 33 è mostrato uno schema dei processi produttivi prima e dopo l'introduzione dell'AM.

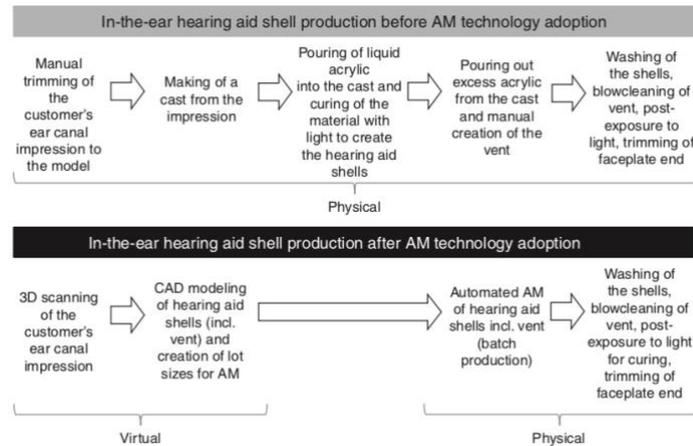


Figura 33: Processo produttivo di apparecchi acustici prima e dopo l'introduzione dell'AM [153]

Il nuovo processo se da un lato offre importanti vantaggi di progettazione, dall'altro comporta una ridefinizione dei ruoli e delle competenze all'interno dell'azienda. Nella maggior parte dei casi, infatti, il personale non possiede le conoscenze necessarie per l'utilizzo della tecnologia; di conseguenza è opportuno assumere addetti specializzati o formare lo staff già presente [152] [153].

Un altro fattore importante per la sua introduzione è la relazione con i fornitori. Come detto in precedenza, la produzione degli oggetti attraverso un unico step permette una gestione più semplice delle relazioni a monte della catena di fornitura; non è necessario acquistare più componenti da vari produttori specializzati, ma il rifornimento può avvenire tramite pochi fornitori. Tuttavia, se da un lato si ha un aumento della standardizzazione dell'approvvigionamento, dall'altro una stretta collaborazione con i fornitori di macchine e materiali è un fattore critico per il successo dell'implementazione. Nelle fasi iniziali, infatti, le aziende devono lavorare a stretto contatto con i produttori delle macchine 3D per acquisire le competenze sufficienti per comprendere le caratteristiche delle stampanti e dei materiali.

---

Inoltre, il passaggio dalla produzione tradizionale all'AM aumenta l'importanza di avere un piano di produzione di lungo periodo dovuto principalmente all'elevato investimento necessario per l'acquisto della tecnologia [153].

## **5.5 Caso di studio: l'AM nella Supply Chain dei pezzi di ricambio**

Numerosi ricercatori [146] [154] [155] [156] hanno focalizzato la loro attenzione sulla catena di fornitura dei pezzi di ricambio, concentrandosi in particolar modo sul settore dell'aeronautica. Questa industria, infatti, è un esempio di quanto sia fondamentale la rapidità delle riparazioni per la creazione del valore per i consumatori. Di conseguenza, affinché ci sia un servizio di riparazione e manutenzione rapido, è necessaria una buona disponibilità di pezzi di ricambio e quindi un'efficiente catena di fornitura di questi. Tuttavia, è quasi impossibile per una compagnia aerea avere tutti i ricambi necessari nel magazzino; basti pensare, ad esempio, ai grandi aerei commerciali costruiti da Boeing o Airbus composti da 4 milioni di pezzi [156].

L'utilizzo delle tecniche produttive tradizionali comporta numerose inefficienze per le imprese del settore. Per evidenziare uno dei principali problemi è necessario classificare i pezzi di ricambio (e quindi le parti di un aereo) in due categorie: standard e non. Per la prima è possibile fare una previsione della domanda e pianificare la produzione, in quanto queste parti devono essere sostituite a intervalli regolari secondo un piano di manutenzione. La maggior parte dei pezzi, però, sono necessari raramente, infatti, sono definiti *slow-moving parts*, ovvero parti generalmente poco movimentate. La necessità di avere all'interno del magazzino questa categoria rappresenta un elevato costo per le imprese sia in termini di obsolescenza che di capitale investito. In molti casi, infatti, i costi di magazzino e di logistica sono sproporzionati rispetto al costo di produzione. L'imprevedibilità della domanda e gli elevati costi che ne derivano hanno portato studiosi e imprese a considerare la fabbricazione additiva come soluzione al problema di inefficienza.

L'implementazione della FA centralizzata, in sostituzione della tenuta del magazzino, riduce, infatti, la necessità di mantenere scorte di sicurezza. Nello specifico, è possibile dividere gli articoli in tre gruppi: A, B e C. I primi sono quelli in rapido movimento (indicati

---

precedentemente come standard), questi rappresentano circa l'80% delle vendite e solo una piccola parte dei costi di gestione del magazzino. I restanti, B e C, fanno aumentare i costi di gestione dell'inventario senza, però, contribuire alla redditività dell'azienda (le parti B rappresentano il 50% dei pezzi e incidono sul 15% delle vendite mentre le parti C costituiscono il 30% degli articoli in magazzino e contribuiscono solo al 5% delle vendite). L'introduzione della FA per la produzione gli articoli *slow-moving* riduce gli elevati costi di magazzino e di logistica sovvenzionati con i profitti derivanti dalla vendita delle parti a rapido movimento. In sostanza, i produttori potrebbero continuare a produrre tramite tecniche tradizionali le parti standard, trasportandole in un magazzino centralizzato, e contemporaneamente produrre, tramite l'AM centralizzato, le parti meno richieste. Questa soluzione permette sia di ridurre i livelli di stock e che di sfruttare a pieno la capacità produttiva delle macchine di FA.

L'AM centralizzato, però, non risolve i problemi dei tempi e dei costi di trasporto; se è necessario fornire il servizio in una sede remota in tempi brevi, l'unica soluzione disponibile al momento è la presenza di un magazzino decentralizzato nella sede. Un'alternativa a questo è l'utilizzo dell'AM distribuito [156].

La localizzazione degli impianti di produzione non solo influenza la configurazione della catena di fornitura ma ha un impatto anche su aspetti economici dell'azienda tra cui il lead time, il livello di servizio offerto e la profittabilità.

Per dimostrare l'alternativa migliore per le aziende è descritto un caso di studio reale presentato da Khajav et al. [155].

Il metodo di analisi fa riferimento ad una modellazione per scenari in cui l'obiettivo è di individuare la configurazione migliore per la produzione tramite AM delle parti di ricambio per i jet *Super Hornet*. Gli scenari analizzati sono 4, determinati in base a due dimensioni: l'evoluzione tecnologica della FA e la configurazione della catena di fornitura (Figura 34).

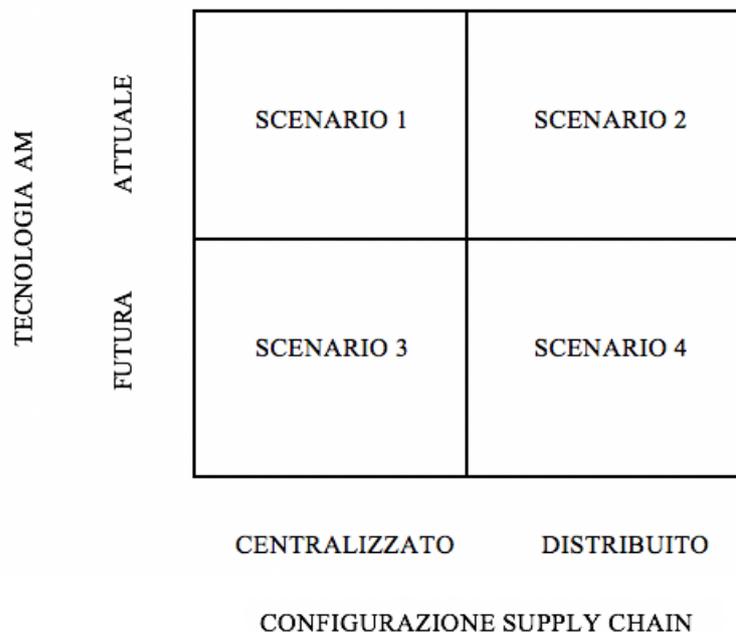


Figura 34: Rappresentazione scenari

Per il confronto è stato considerato il costo operativo totale di ogni singola alternativa che comprende: personale, materiale, trasporto, inventario, tempo di fermo degli aerei, obsolescenza delle scorte, ammortamento e costo annualizzato della produzione dell'inventario iniziale. Dopo aver fissato la domanda annuale a un livello specifico è stata eseguita una simulazione per determinare le probabilità di esaurimento scorte, che ha permesso di individuare i costi operativi minimi per ogni scenario. Successivamente, considerando i casi ottimali sono state analizzate le singole componenti di costo per capire in quali circostanze l'AM distribuito è più conveniente.

Inoltre, per il futuro concetto di macchina AM, è stata considerata la variazione di due caratteristiche chiave: il livello di automazione e le dimensioni della camera di produzione. Per livello di automazione si intende il rapporto tra numero di macchine e operatori dedicati a queste, pertanto all'aumentare di questo diminuisce il numero di operatori necessari per le fasi di pre e post- produzione. Le dimensioni della camera di produzione sono state ridotte di un sesto, con una conseguente riduzione di sei volte del prezzo di acquisto.

Il primo confronto considera gli scenari 1 e 2, nei quali le macchine utilizzate per la produzione hanno le specifiche attuali. La tabella 1 mostra la preferenza della produzione con AM centralizzato, in quanto genera un costo totale inferiore. Le principali ragioni sono

---

la differenza del numero di macchine utilizzate e il loro prezzo di acquisto che produce un costo di ammortamento annuale significativo. In aggiunta, un altro motivo rilevante è l'elevato costo del personale dovuto all'implementazione dell'AM distribuito su larga scala [155].

<b>Voce costo</b>	<b>Scenario 1 (\$/anno)</b>	<b>Scenario 2 (\$/anno)</b>
Personale	120.000	480.000
Materiale	500.000	500.000
Trasporto pezzi ricambio	58.700	0
Trasporto inventario	91.500	60.000
Tempo inattività aereo	17.107	1.909
Obsolescenza	47.638	31.328
Ammortamento	175.000	700.000
Costo annuale produzione dell'inventario iniziale	31.759	20.825
<b>Totale</b>	<b>1.041.704</b>	<b>1793.972</b>

*Tabella 1: Confronto tra AM centralizzato e distribuito con tecnologie presenti*

Nel confronto tra gli altri due scenari, al contrario, è possibile osservare nella Tabella 2 un leggero vantaggio di costo nell'alternativa della produzione distribuita. Ciò evidenzia che l'evolversi della tecnologia porterà a cambiamenti radicali nella catena di fornitura dei pezzi di ricambio [155].

---

<b>Voce costo</b>	<b>Scenario 1 (\$/anno)</b>	<b>Scenario 2 (\$/anno)</b>
Personale	20.000	80.000
Materiale	500.000	500.000
Trasporto pezzi ricambio	58.700	0
Trasporto inventario	91.500	30.000
Tempo inattività aereo	17.107	12.723
Obsolescenza	33.354	10.936
Ammortamento	29.167	11.,667
Costo annuale produzione dell'inventario iniziale	22.236	7.290
<b>Totale</b>	<b>772.064</b>	<b>757.616</b>

*Tabella 2: Confronto tra AM centralizzato e distribuito con tecnologie future*

Attualmente, la produzione centralizzate è l'alternativa più efficiente, in futuro, però, la riduzione del prezzo delle macchine AM e l'aumento del livello di automazione porteranno a preferire la produzione distribuita.

---

## Capitolo 6 – Influenza sulle strategie di reshoring

Le tecnologie dell'industria 4.0, tra cui rientra la fabbricazione additiva, sono ormai fondamentali per raggiungere un vantaggio competitivo o in alcuni casi per sopravvivere in alcuni settori. Il loro utilizzo comporta elevati livelli di efficienza operativa e di produttività, consentendo la personalizzazione dei prodotti e rendendo la catena di produzione flessibile e automatica.

Un importante aspetto da considerare è la relazione tra l'implementazione di queste tecnologie e la scelta di *reshoring* da parte delle aziende. In particolare, se l'industria 4.0 può essere un driver o una conseguenza nella strategia di rimpatrio delle attività produttive. Una ricerca condotta da Ancarani et al [157] afferma che le aziende hanno citato esplicitamente, come ragione del *reshoring*, la robotica avanzata e la produzione additiva. Ciò evidenzia come le società siano attratte da tecnologie legate principalmente al miglioramento delle attività produttive e di progettazione, piuttosto che dai benefici dell'integrazione digitale.

Sebbene l'AM è più diffusa rispetto ad altre tecnologie digitali, il suo utilizzo in attività produttive è agli albori; di conseguenza la sua relazione con le strategie di *reshoring* è difficile da dimostrare empiricamente.

Fratocchi [158] ha condotto uno studio esplorativo per dimostrare se la FA ha il potenziale per supportare le strategie di riallocazione. La ricerca ha analizzato un campione di 728 decisioni di *reshoring* prese da 600 aziende (alcune di queste infatti hanno implementato la strategia più volte) individuando per ognuna la principale motivazione.

Come mostrato nella Tabella 3 solo 8 decisioni di *reshoring* su 728 sono dovute in modo diretto all'adozione della tecnologia di FA.

Motivazione reshoring	n° decisioni
Costi logistici	136
Effetto "made in"	124
Scarsa qualità	122
Riduzione dei differenziali di costo	103
Riduzione costo totale	101
Miglioramento livello di servizio	97
Tempo di consegna	82
Aiuti governativi	69
Vicinanza R&D alla produzione	68
Riorganizzazione globale dell'azienda	68
Riduzione costi di coordinamento	63
Lotto di dimensioni minime	40
Inadeguatezza della forza lavoro del Paese ospitante	29
Crisi economica globale	29
Flessibilità organizzativa	28
Incentivi Walmart (solo per aziende statunitensi)	26
Elementi emotivi (es. Patriottismo)	17
Contraffazione di marchi	16
Disponibilità di capacità produttiva a casa	15
Attrattività bassa del mercato ospitante	15
Pressione sociale nel paese di origine (ad es. Sindacati)	12
Problemi di proprietà intellettuale	12
Doveri di reimportazione	10
Automazione dei processi / Nuove tecnologie di produzione	9
Costi energetici	8
<b>Adozione di tecnologie additive</b>	<b>8</b>
Assenza di fornitori nel Paese ospitante	6
Sostenibilità ambientale	3

Tabella 3: Motivazioni reshoring

Tuttavia, osservando nello specifico le motivazioni che hanno portato le aziende ad attuare il rimpatrio di alcune attività, è possibile notare come l'implementazione delle tecnologie additive possa contribuire al raggiungimento di tali obiettivi. Nello specifico, su 28 ragioni

---

indicate dalle aziende 13 possono essere sovrapposte ai benefici dell'AM precedentemente descritti [158].

- Costi logistici: l'AM ha un forte impatto su tutti i costi legati alla catena di fornitura. La sua implementazione, infatti, permette di eliminare la fase di assemblaggio e di ridurre la necessità di scorte in magazzino.
- Effetto “*made in*”: in questo caso il vantaggio della FA è indiretto; la sua adozione all'interno del Paese d'origine consente la produzione di prodotti che beneficiano dell'effetto “*made in*” [158].
- Scarsa qualità: nonostante in molti casi la produzione additiva non garantisca la stessa qualità superficiale delle tecniche tradizionali, la sua implementazione è sicuramente preferibile alla produzione *offshore* in Paesi esteri dove il mantenimento di determinati standard è impossibile o economicamente dispendioso.
- Riduzione dei differenziali di costo: legato anche in questo caso all'assenza della fase di assemblaggio.
- Riduzione costo totale: nel caso di piccoli lotti è possibile avere una diminuzione dei costi di produzione in quanto non sono necessari utensili specifici. In aggiunta, si ottiene un risparmio grazie alla riduzione degli scarti di materiale e alla possibilità di realizzare economicamente parti complesse.
- Miglioramento livello di servizio e dei tempi di consegna: la rapidità della modifica del design consente di realizzare prodotti personalizzati migliorando il servizio offerto al cliente. Inoltre, la possibilità di localizzare gli impianti in luoghi in prossimità dei consumatori riduce notevolmente i tempi di consegna.
- Aiuti governativi: in alcuni casi le aziende sono spinte a rientrare nel Paese d'origine grazie ai numerosi incentivi che gli Stati offrono. Le politiche attuate dal Governo italiano nel quinquennio 2013-2018 a favore della produzione sul territorio nazionale si sono concentrate in particolar modo sulle potenzialità dell'industria 4.0. Il piano è stato avviato con la legge di bilancio per il 2017 ed è stato successivamente definito “piano nazionale 4.0”; questo è dotato di 9,8 miliardi di euro per il periodo compreso tra il 2018-2028 (di cui 7,8 per iperammortamento e superammortamento). A differenza delle tecniche di produzione tradizionale, per le quali la localizzazione incide molto sul costo del lavoro, il prezzo delle tecnologie digitali è relativamente omogeneo in tutto il mondo; la loro implementazione, perciò, può consentire alle

---

aziende italiane il raggiungimento del vantaggio competitivo senza la necessità di delocalizzare la produzione [21].

- Vicinanza R&D alla produzione: come detto nel primo capitolo, la lontananza della produzione dalle attività di ricerca e sviluppo ha un effetto negativo sull'innovazione. Nella maggior parte dei casi, le aziende che decidono di attuare il *reshoring* con l'obiettivo di favorire la riprogettazione dei processi e del prodotto implementano le tecnologie digitali per farlo. Nello specifico, le caratteristiche della FA additiva offrono un vantaggio rilevante nella fase di progettazione del prodotto e consentono la riprogrammazione del processo produttivo rendendolo più snello e flessibile.
- Riduzione costi di coordinamento: di per sé la decisione di *reshoring* riduce i costi di monitoraggio e controllo dovuti alla complessità della catena globale di fornitura. L'adozione dell'AM centralizzato, in aggiunta, può comportare un ulteriore calo di questi grazie alla semplificazione della Supply Chain.
- Lotti di dimensioni minime: la strategia di *reshoring* è attuata prevalentemente come azione correttiva a precedenti errori di valutazione nella scelta di delocalizzazione. I fallimenti sono dovuti principalmente alla mancanza di informazioni della destinazione estera e a una scarsa analisi sui costi e sugli investimenti che questa strategia comporta; in alcuni casi, infatti, le aziende orientate al mantenimento dell'efficienza dei costi tendono a delocalizzare per imitazione e non basandosi su presupposti affidabili nel lungo e medio termine [15]. Questo fenomeno si verifica specialmente per le aziende che hanno una produzione in lotti, per le quali l'offshoring è sicuramente una scelta non redditizia. L'introduzione della FA additiva è, al contrario, una decisione strategicamente più adatta per raggiungere l'obiettivo dell'efficienza.
- Flessibilità organizzativa: l'introduzione dell'AM comporta una variazione dei processi aziendali; tutte le fasi di creazione di prodotto, dalla progettazione alla produzione vera e propria, devono essere ridisegnate secondo una nuova ottica. Tuttavia, se da un lato questo comporta un importante investimento in conoscenza e tecnologia, dall'altro migliora la flessibilità aziendale. Un esempio è la riduzione dei tempi dalla fase di prototipazione a quella di produzione; una volta testato un prototipo è possibile, infatti, realizzarlo e proporlo sul mercato in tempi brevi senza la necessità di modificare la linea produttiva. Ancora, le modifiche di progettazione in risposta alle esigenze dei clienti sono effettuate prontamente.

- 
- **Sostenibilità ambientale:** attraverso la FA è possibile migliorare l'eco-sostenibilità dei prodotti; un esempio sono parti di automobili e aerei che, prodotte tramite le tecniche additive, risultano essere più leggere contribuendo così alla riduzione del consumo di carburante. Inoltre, a differenza dei processi sottrattivi, l'implementazione dell'AM consente di diminuire in modo considerevole la produzione di scarti [158].

In conclusione, lo studio suggerisce che, attualmente, l'implementazione dalla FA non costituisce un driver del *reshoring*. Una prima motivazione è la mancanza delle conoscenze necessarie. In aggiunta, a seguito dei costi dovuti alla delocalizzazione interna, molte aziende non hanno le risorse necessarie per investire nelle tecnologie di fabbricazione additiva.

Tuttavia, la riduzione dei costi delle macchine e una conoscenza sempre più approfondita, potrebbe indurre molte imprese a considerarla come valida alternativa per il raggiungimento degli obiettivi aziendali.

## 6.1 Variazioni del modello di governance

L'*offshoring* e *reshoring* implicano una decisione sul modello di governance che l'azienda vuole seguire, ovvero, una scelta tra l'*insourcing* e l'*outsourcing*. Se nella maggior parte dei casi il modello adottato per delocalizzazione è stato l'*outsourcing*, la ricerca attuale suggerisce che il fenomeno del *reshoring* porta le aziende a preferire l'integrazione verticale. Nello specifico il *reshoring insourcing* è correlato significativamente all'utilizzo delle tecnologie dell'industria 4.0. Un primo motivo è la volontà di ridurre i costi di transazione e di semplificare le attività di monitoraggio e controllo grazie all'utilizzo delle nuove tecnologie digitali. Oltre alle considerazioni economiche la scelta dipende a volte da fattori esogeni, molte aziende rientrano la produzione in Paesi in cui la base dei fornitori è drasticamente diminuita imponendo così la sostituzione del lavoro tradizionale con la nuova tecnologia [157].

---

## 6.2 Caso di studio: Adidas e la Speed Factory

Dagli anni Novanta la nota società di articoli sportivi, come del resto molti *competitors*, ha delocalizzato in oriente la maggior parte della sua produzione. Se, infatti, le fasi di progettazione e prototipazione sono rimaste in Europa, tutto il resto della filiera è stato trasferito nei Paesi in via di sviluppo [159]. Tuttavia, questa decisione strategica ha comportato non pochi ostacoli: i numerosi scandali sulle condizioni lavorative nei capannoni asiatici ha compromesso l'immagine del brand che indica come valore "la promozione di una cultura positiva" [160]. Inoltre, la difficoltà di gestire e monitorare fornitori a mille miglia di distanza e l'espandersi del concetto di personalizzazione come fattore critico di successo, ha incentivato l'azienda a riallocare la produzione in Germania e negli Stati Uniti.

La produzione di scarpe, però, è un processo labour intensive, motivo per cui gran parte dei prodotti Adidas è sempre stata prodotta in Paesi con economie a basso salario. Per questo motivo, la realizzazione degli stessi prodotti in economie con un costo del lavoro più alto ha comportato la necessità di automatizzare i processi produttivi in modo da ridurre la forza lavoro.

Nonostante la tecnologia additiva offra numerosi vantaggi, un grosso limite è la necessità di fasi di pre e post-produzione che richiedono l'intervento da parte dell'operatore. Attualmente, infatti, benché la sua adozione favorisca la personalizzazione, esistono numerosi ostacoli per la customizzazione di massa.

Pertanto, la nota società tedesca ha costruito la Speedfactory per automatizzare molti processi che precedentemente venivano eseguiti manualmente. L'innovazione risiede nell'unione di diverse tecnologie digitali già esistenti; la FA è, infatti, un processo all'interno di una catena già altamente automatizzata che ha permesso il passaggio da una produzione di massa standardizzata a una personalizzata [161].

La scelta di *reshoring* non è dipesa solo dall'aumento dei salari nei Paesi emergenti che in un primo momento avevano attirato l'attenzione di molte società, ma e soprattutto dalla volontà di avvicinare i prodotti ai consumatori. Come ha affermato Katja Schreiber (responsabile della comunicazione): "Idealmente i rivenditori saranno in grado di fare ordinazioni in base alle tendenze del momento e non avremo bisogno di tenere molta merce in magazzino da distribuire in caso di necessità" [162]. L'obiettivo era, infatti, quello di

---

localizzare gli impianti nelle città principali per il mercato dell'Adidas, modificando la produzione in base alle caratteristiche di questo.

Tuttavia, nonostante la strategia per raggiungere un importante vantaggio competitivo sul mercato fosse vincente, i costi da sostenere furono troppo elevati. Come detto in precedenza i vantaggi di delocalizzare la produzione comporta numerosi costi: è necessario investire ingenti somme per duplicare beni capitali, strutture e forza lavoro (anche se nel caso specifico questi ultimi erano stati ridotti). La possibilità di personalizzare i prodotti in base alle esigenze dei consumatori non è stata abbastanza profittevole da giustificare i costi della tecnologia, delle strutture e il cambiamento radicale della catena di fornitura [161].

L'azienda, però, non ha rinunciato al concetto di fabbrica automatica bensì ha trasferito la tecnologia in Asia; ciò ha permesso di sviluppare la nuova idea senza dover creare una Chain basata interamente su nuove tecnologie e in mercati dove il costo del lavoro è sicuramente più elevato.

### **6.3 Caso di studio: Thinklabs**

Thinklabs è un'azienda statunitense che produce stetoscopi fondata nel 1991 dall'ingegnere Clive Smith. Nel 2003, la produzione è stata trasferita in Cina; come ha affermato lo stesso CEO in un'intervista "la Cina è la scelta predefinita se si dispone di un prodotto completo pronto per la produzione" [163]. Tuttavia, gli investimenti in ricerca e sviluppo hanno permesso di ideare uno stetoscopio di ultima generazione che poteva essere realizzato attraverso l'utilizzo delle tecniche di FA in modo da aumentare la flessibilità delle fasi di progettazione e produzione del prodotto. Per questo motivo, nel 2014, la produzione è stata trasferita presso la sede dell'azienda in Colorado dove sono presenti diversi laboratori che realizzano i componenti tramite macchine additive che successivamente vengono assemblati e testati prima del confezionamento. In questo caso, l'obiettivo principale del *reshoring* e dell'adozione dell'AM è la possibilità di avere una struttura più flessibile, lo stesso Smith ha dichiarato di voler "la flessibilità per progettare nuovi prodotti e svilupparli rapidamente. Questa capacità di innovare al volo ci consente di espandere la nostra base di clienti per soddisfare altre esigenze di assistenza sanitaria specialistica " [163].

---

## 6.4 Caso di studio: OtterBox

Negli anni passati, se si acquistava un accessorio da OtterBox, leader statunitense del settore, era un dato di fatto che questo non fosse stato realizzato negli Stati Uniti. Tuttavia, la riduzione dei differenziali di costo e il contemporaneo aumento delle spese di trasporto e di spedizione dovute a maggiori costi energetici ha portato sempre più aziende, a riallocare la produzione negli Stati Uniti. Nel 2012, Bill Lovell, direttore della catena di fornitura globale, ha infatti affermato di avere riallocato in Colorado tra il 15 e il 20% del volume totale di produzione [164].

Anche in questo caso, però, il driver della scelta di *reshoring*, oltre alla riduzione dei costi, è la vicinanza ai clienti; nello specifico, la volontà di ridurre il *time-to-market*. Al giorno d'oggi, il tempo di risposta è fondamentale per aziende che competono in un settore dell'elettronica nel quale l'innovazione e il lancio dei prodotti è a una velocità sicuramente più rapida rispetto a 10 anni fa. Lo stesso Lovell ha dichiarato che “in un mercato in rapida evoluzione, dove ci sono molti nuovi dispositivi rilasciati su base continuativa, essere in grado di avere il tuo prodotto disponibile il primo giorno in cui lo smartphone è disponibile nel negozio è piuttosto fondamentale per la nostra attività” [164].

Se quindi la ragione principale della riallocazione è stata la soddisfazione dei clienti, l'innovazione tecnologica è diventata un fine per raggiungere questo obiettivo.

L'azienda, infatti, promotrice dell'innovazione, adotta la tecnologia additiva dal 2005. Nel 2016, l'acquisto del nuovo modello J750 di *Stratasys* ha contribuito al miglioramento della fase di sviluppo prodotto: il processo che in precedenza richiedeva 26 settimane ne necessita attualmente solo 8 grazie alla possibilità di trasformare rapidamente le idee in prototipi [165]. Inoltre, in collaborazione con *3Hubs* è stato creato l'*uniVERSE Case System* che comprende una custodia protettiva, per iPhone e iPad, con un supporto per un binario modulare montato sul retro che permette il collegamento di una varietà di accessori [166]. La novità di OtterBox è stata quella di rilasciare il file CAD consentendo a ognuno di progettare il proprio accessorio. Un cliente può acquistare la custodia, scaricare il file CAD, ideare e successivamente stampare l'accessorio desiderato. Kristen Tatti, responsabile delle comunicazioni di OtterBox, ha dichiarato che il fine aziendale era quello di “creare un'esperienza mobile personalizzabile che fosse perfetta e che consentisse davvero agli utenti di liberare la potenza del proprio smartphone” [167].

---

I tre casi appena descritti sono una dimostrazione di come la strategia di *reshoring* e l'adozione della FA siano preferite da aziende orientate all'innovazione. L'obiettivo principale non è la riduzione dei costi bensì la volontà di aumentare il valore percepito dal cliente garantendo un servizio più rapido, attraverso la riduzione del time-to-market, e offrendo un prodotto personalizzato. Tuttavia, come dimostra il caso Adidas, affinché la tecnologia additiva sia utilizzata dalle aziende che decidono di riportare alcune attività nei Paesi d'origine è necessaria un'analisi sui costi e benefici che ne derivano. Attualmente, infatti, la poca conoscenza nella fase di produzione vera e propria e gli elevati costi di acquisto limitano la sua diffusione.

---

## Capitolo 7 – Impatto sulla sostenibilità

Nei capitoli precedenti sono stati analizzati i vantaggi dell'utilizzo della Fabbricazione Additiva come tecnologia di produzione. La possibilità di realizzare prodotti personalizzati e di comprimere le catene di fornitura sono, infatti, tra le principali motivazioni per cui le aziende hanno iniziato ad implementare questa tecnologia. Tuttavia, affinché l'AM possa essere definita una tecnologia dirompente, è necessario approfondire le implicazioni sociali e ambientali che la sua adozione comporta. Uno sviluppo, infatti, può essere definito sostenibile solo se “soddisfa i bisogni del presente senza compromettere la capacità delle generazioni future di soddisfare i propri bisogni” [168].

### 7.1 Analisi delle fasi del ciclo di vita del prodotto e del materiale

I benefici della FA possono essere riscontrati in diverse fasi del ciclo di vita del prodotto e del materiale.

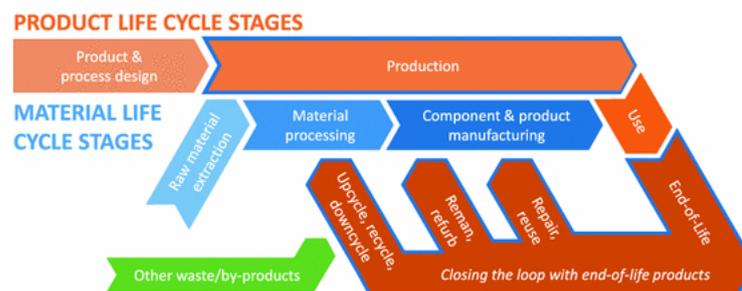


Figura 35: Fasi del ciclo di vita del prodotto e del materiale [169]

#### 7.1.1 Riprogettazione del prodotto

L'adozione della FA consente di riprogettare gli oggetti migliorandone le funzionalità. Il modello CAD, infatti, permette di modificare i requisiti specifici del prodotto in base al suo

---

utilizzo. I miglioramenti delle nuove strutture incorporate all'interno dei componenti includono una maggiore resistenza e rigidità, efficienza energetica e resistenza alla corrosione [170]. Inoltre, con un design ottimizzato è possibile ottenere una riduzione del peso di un pezzo di un intervallo compreso tra il 35 e il 65% [171]. Questa possibilità diventa particolarmente utile quando un componente deve essere assemblato in un sistema di trasposto, poiché la leggerezza si traduce in una riduzione di carburante e delle relative emissioni di  $CO_2$  [172].

Uno dei settori che ha maggiormente beneficiato della tecnologia additiva è quello aerospaziale. La produzione dei componenti aerei ha, infatti, un impatto negativo sull'ambiente, causato sostanzialmente dall'eccessivo spreco di materiale durante i processi di produzione tradizionali. L'elevato rapporto *buy-to-fly*, infatti, non ha un effetto solo sui costi dell'industria, di cui si è precedentemente discusso, ma contribuisce, anche, ai problemi legati alla sostenibilità ambientale. Negli ultimi anni, la riprogettazione dei prodotti tramite la FA ha permesso di ridurre notevolmente questi problemi.

La stampa di ugelli da parte di GE, nella fabbrica in Alabama, per i motori a reazione LEAP (accennato in precedenza) è un buon esempio di come la riduzione del peso del 25% ha portato a una diminuzione del 20% del consumo di carburante e a un aumento del 10% della potenza [173].

Inoltre, la riprogettazione può portare alla realizzazione di prodotti più semplici che richiedono meno componenti e materiali, ciò permette una diminuzione dei flussi di materiali con una conseguente riduzione dell'impatto ambientale lungo l'intera catena di fornitura.

## 7.1.2 Riprogettazione del processo

Oltre ai vantaggi nella progettazione del prodotto, l'integrazione della FA può apportare miglioramenti alla progettazione del processo di produzione. Grazie all'integrazione di componenti realizzati tramite tecniche additive (ad esempio stampi e utensili) il processo di produzione può diventare più efficiente sia dal punto di vista energetico che dell'utilizzo delle risorse.

Un esempio è *Salcomp*, leader mondiale nella produzione di prese elettriche e alimentatori per telefoni cellulari. L'azienda finlandese opera in un settore ad alto volume, nel quale i

---

costi e l'efficienza sono le principali forze trainanti del mantenimento di una posizione competitiva. Nel raggiungere l'efficienza produttiva del suo stabilimento di Chennai, la società ha individuato, come uno dei fattori limitanti, il tempo di raffreddamento nel processo di stampaggio a iniezione. Per questo motivo è nata la collaborazione con EOS, sviluppatore tedesco della tecnica di FA di sinterizzazione laser diretta del metallo (DMLS). Grazie alla partnership, infatti, gli ingegneri di Salcomp sono stati in grado di riprogettare la struttura di ventilazione degli stampi, utilizzati durante il processo produttivo, affinché il calore venisse dissipato più rapidamente. Questi stampi sono stati poi prodotti utilizzando la tecnologia DMLS. Il principale vantaggio della riprogettazione è stato la riduzione del tempo di raffreddamento da 14 s a 8 s, che ha consentito la produzione di 56.000 unità in più ogni mese. Un vantaggio secondario è stato il miglioramento della qualità, con tassi di rigetto ridotti dal 2 all'1,4% [170].

Il potenziale di riprogettazione del processo va oltre al tradizionale concetto di produzione: il settore delle costruzioni, principale consumatore di materiali, energia e acqua, offre significative opportunità di miglioramento dell'efficienza delle risorse. Gli esempi descritti nel capitolo 4 dimostrano, infatti, che la produzione in situ, riduce notevolmente gli impatti ambientali legati al trasporto di merci da e verso il cantiere [170].

### **7.1.3 Lavorazione delle materie prime**

Le materie prime utilizzate per le tecnologie additive offrono diverse opportunità di miglioramento della sostenibilità ambientale. Così come esistono diverse tecniche di FA, è disponibile, infatti, una significativa varietà di materiali utilizzati come input; la natura dipende dal processo specifico che si vuole adottare. Le quattro principali categorie sono: liquido, filamento / pasta, polvere e foglio solido [170].

Durante la fase di lavorazione delle materie prime, è possibile ripensare al processo di creazione in modo da ridurre al minimo le risorse necessarie per trasformare i materiali nella forma utilizzabile per i processi di produzione. Un esempio sono le polveri metalliche adottate nella sinterizzazione laser e negli approcci di fusione per le quali viene spesa un'energia significativa durante il processo di raffinazione e lavorazione dei minerali metallici. L'azienda britannica Metalysis sta appunto cercando di affrontare questo

---

problema commercializzando un processo per la produzione della polvere di titanio direttamente dal minerale. Questo metodo, denominato *FFC-Cambridge*, richiede molta meno energia per produrre la polvere rispetto al tradizionale processo Kroll. Inoltre, per l'affinamento, utilizza il coluro di calcio, ovvero un reagente non tossico che può essere riutilizzato [170].

Tuttavia, la relativa immaturità della tecnologia provoca uno scarso sviluppo di queste nuove tecniche di lavorazione delle materie prime. In aggiunta, la possibilità di applicare nuovi metodi è impedita, in molti casi, dalla mancanza di standard per convalidare le proprietà meccaniche e termiche dei processi e dei materiali [170].

### **7.1.4 Processo di produzione**

La natura additiva dell'AM lo rende un processo di produzione più efficiente sotto il profilo delle risorse poiché vengono generati meno rifiuti rispetto alle tecniche sottrattive.

Un altro aspetto fondamentale è la possibilità di passare da una produzione di massa tradizionale (che sfrutta le economie di scala) a una produzione di piccoli lotti personalizzati. La produzione su ordinazione riduce, infatti, la quantità complessiva di risorse consumate. In sostanza, l'AM può consentire la dematerializzazione e una minore intensità energetica in tutto il sistema [170].

### **7.1.5 Riparazione dei componenti**

La riparazione dei componenti è una strategia chiave per diminuire l'impatto ambientale dei processi produttivi. A tal proposito, le tecniche additive possono essere utilizzate per riparare parti e utensili danneggiati o dismessi in modo da estendere la loro durata, garantendo una riduzione del consumo di energia necessario per produrli da zero. La riparazione di un utensile, infatti, offre una riduzione di energia del 50% [174].

Diverse società che già hanno integrato la FA per produrre parti funzionali, hanno iniziato ad adottare la stessa tecnologia per la riparazione dei componenti. Un esempio è l'azienda Rolls-Royce che impiega il processo di *laser material deposition* (LMD) sia per produrre i

---

blisk (presenti nei motori aeronautici) che per la riparazione in situ, massimando così il loro l'utilizzo e prolungando la vita operativa [170].

## 7.1.6 Chiusura del ciclo

La cosiddetta “chiusura del ciclo di vita del prodotto” può essere ottenuta in diverse fasi e interessare in modo diverso l'AM. Il valore di recupero più elevato è raggiunto localmente nel processo di produzione durante il quale il materiale non utilizzato viene introdotto nuovamente nel ciclo di produzione. Per le polveri metalliche si stima che il 95-98% della materia prima impiegata possa essere riciclata e riutilizzata [170].

Per quanto riguarda l'ultima fase del ciclo di vita del prodotto, i sistemi di riciclo in-situ possono essere collegati con l'Additive Manufacturing, ovvero i materiali diventati ormai rifiuti da smaltire vengono riutilizzati in nuove applicazioni. In questo contesto, iniziative come *Better Future Factory*, aiutano a sensibilizzare e istruire i consumatori sul riciclaggio di materiali come ad esempio la plastica. Il progetto *Perpetual Plastic Project* (PPP) analizza, infatti, le possibilità di riutilizzare questo materiale come input per la stampa 3D [170].

La collaborazione tra EKOCYCLE, marchio lanciato da will.i.am e Coca-Cola, e 3D System, ha permesso di realizzare la stampante 3D EKOCYCLE CUBE. In linea con l'obiettivo del brand, ovvero quello di sponsorizzare prodotti riciclati, la tecnologia utilizza un nuovo filamento realizzato, in parte, con bottiglie di plastica riciclate. L'obiettivo aziendale è la possibilità di collaborare con i marchi più influenti spaziando dall'industria high-tech a quella dell'arte, proponendo un prodotto che pone l'accento sul riciclaggio e incoraggiando a considerare un rifiuto non come tale ma come vera e propria risorsa [175].

Oltre al riutilizzo della plastica, un forte impatto ambientale è fornito dalla possibilità di rigenerare i componenti. L'azienda Caterpillar, leader in questo processo, adotta nuove tecniche di riparazione innovative (tra cui la FA) per molti dei suoi motori, riducendo così gli sprechi, abbassando la produzione di gas serra e diminuendo la necessità di materie prime [176]. La rigenerazione consiste nel riutilizzo di un prodotto a fine vita per produrlo nuovamente. Una volta che il consumatore ha restituito la parte all'azienda, questa viene smontata fino al più piccolo componente. In un secondo momento ogni elemento passa

---

attraverso un processo di pulizia e viene ispezionato per determinare se può essere efficacemente recuperato. I componenti che superano il controllo vengono convertiti in materiali per la produzione [176]. Uno schema del processo è mostrato in Figura 36.

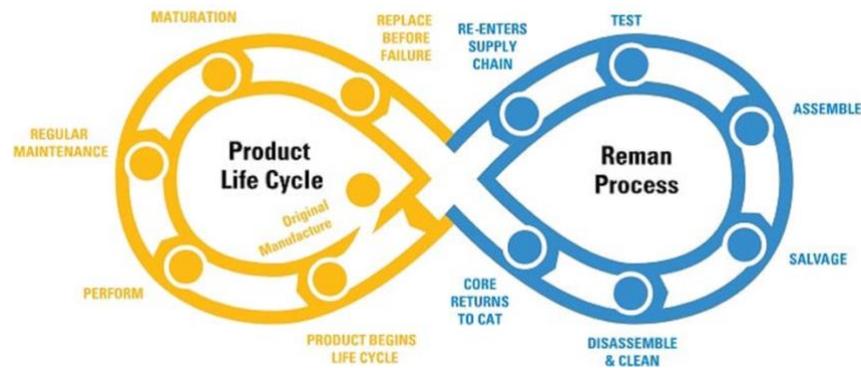


Figura 36: Schema processo di rigenerazione di un prodotto [176]

## 7.2 Consumo energetico

La maggior parte dei processi AM utilizza più energia dei processi convenzionali se il confronto viene effettuato a livello di processo o macchina. I metodi di fusione industriale che utilizzano polveri metalliche e fasci ad alta energia, infatti, possono consumare molta più elettricità per unità di produzione rispetto ai metodi di produzione tradizionali. Inoltre, la materia prima può avere una maggiore energia incorporata.

Tuttavia, la tecnologia additiva consente di realizzare prodotti complessi in un'unica fase evitando gli impatti energetici della produzione di più parti e del successivo assemblaggio [177].

L'efficienza energetica delle tecniche di fabbricazione additiva varia notevolmente a causa di diverse variabili tra cui le materie prime, il tipo di processo e l'utilizzo del prodotto realizzato. Per questo motivo non è possibile stabilire a priori la strategia di produzione più sostenibile dal punto di vista ambientale, ma ogni scenario di produzione rende preferibile l'adozione della tecnologia convenzionale o della tecnologia additiva [178]. In alcuni casi, i metodi di FA si sono dimostrati più efficienti per piccoli lotti poiché non sono necessari

---

strumenti o attrezzature, mentre i metodi convenzionali sono più sostenibili per quantità più elevate [177]. Inoltre, per la scelta non è sufficiente confrontare il consumo di energia del solo processo produttivo, ma è necessario osservare l'intero ciclo di vita del prodotto. È stato dimostrato, infatti, che fattori fondamentali per la scelta sono la possibilità di ridisegnare la geometria del pezzo, all'applicazione d'uso finale del componente, nonché la politica relativa al riciclo dei materiali. La fabbricazione additiva è l'alternativa migliore nel caso in cui la riduzione del peso dei pezzi realizzati introduca benefici in fase di utilizzo [172].

### **7.3 Sostenibilità sociale**

L'uso crescente dell'AM per piccole produzioni personalizzate, sta modificando i modelli di business causando impatti imprevedibili non solo sulle aziende ma anche sulla società.

L'introduzione della FA in campo medico è un chiaro esempio di come questa tecnologia abbia un impatto positivo sulla vita delle persone. L'AM permette, infatti, di produrre protesi e dispositivi medici personalizzati per migliorare la salute e il benessere della popolazione [147].

Nei Paesi sviluppati l'impatto della FA è positivo, in particolar modo per le società che "invecchiano", le quali potrebbero beneficiare della possibilità di produrre beni con meno personale, riducendo la dipendenza delle importazioni. Al contrario la diffusione nei Paesi meno sviluppati potrebbe causare disoccupazione e insicurezza sociale [179]. Uno dei principali fattori sociali da analizzare è, infatti, il tasso di occupazione dei lavoratori e in particolare se questo è destinato ad aumentare. L'adozione dell'AM può essere una causa di disoccupazione per il personale non qualificato ma allo stesso tempo diventare promotrice per i lavoratori specializzati. In sostanza, il processo non esclude la forza lavoro, ma ne richiede una con determinate competenze. Inoltre, l'introduzione della tecnologia nelle aziende non solo implica la necessità di formazione e riqualificazione del personale, ma ha un effetto anche sull'istruzione. Molte società valutano, infatti, nei processi di reclutamento, nelle aree di ingegneria, la conoscenza della tecnologia additiva. Per questa ragione è necessario apportare cambiamenti nella formazione universitaria affinché la preparazione dei laureandi sia in linea con le nuove tendenze tecnologiche [180].

---

Per quanto riguarda la salute e la sicurezza dei lavoratori, l'implementazione della FA comporta un vantaggio grazie a una ridotta esposizione a processi rumorosi e alla maggiore autonomia dei macchinari che consente di ridurre il contatto uomo-macchina. Tuttavia, esistono pericoli tossicologici e ambientali sconosciuti derivanti dall'utilizzo, per contatto diretto o per inalazione, di materiali termoplastici, i quali, rilasciando particelle e fumi tossici, aumentano il rischio per la salute del personale.

L'impatto dell'AM sui diritti e le politiche di proprietà intellettuale non è chiaro. L'utilizzo delle piattaforme open source che mettono le informazioni a disposizione di tutti, contribuendo a uno sviluppo socioeconomico sostenibile, richiede la modifica delle attuali forme di protezione quali sistemi di copyright o brevetti [181].

---

## Capitolo 8 – Conclusioni

L'introduzione delle tecnologie dell'industria 4.0 ha portato notevoli cambiamenti in diversi ambiti. L'obiettivo del seguente elaborato è quello di analizzare l'impatto della fabbricazione additiva sulla Supply Chain, sul fenomeno del *reshoring* e sulla sostenibilità. Nello specifico, il capitolo introduttivo presenta i concetti di Supply Chain e di *reshoring*, i quali sono discussi nei capitoli successivi in relazione appunto all'AM. Il punto di partenza dell'analisi è di carattere teorico-descrittivo; nella la prima parte del lavoro è presentato il concetto di Additive Manufacturing, le principali tecniche, i limiti e benefici che questa nuova tecnologia di produzione comporta. Una particolare attenzione è posta alla standardizzazione della fabbricazione additiva, in quanto la mancanza appunto di standard adeguati rappresenta il principale limite della sua diffusione. Nel capitolo 4 sono presentati i principali settori in cui le tecniche additive sono maggiormente utilizzate, descrivendo i vantaggi che l'implementazione nella fase produttiva può apportare alle aziende. La seconda parte del lavoro analizza se e come l'introduzione dell'AM abbia un impatto sui concetti descritti nel primo capitolo. Come dimostrato nel capitolo 5 la nuova tecnologia permette, almeno da punto di vista teorico, di eliminare nodi intermedi della catena di approvvigionamento, riducendo i tempi di trasporto e avvicinando la produzione al consumatore finale. Nel caso limite, come evidenziato nel paragrafo 5.3, potrebbero essere gli stessi clienti a diventare produttori, eliminando completamente il flusso fisico lungo tutta la Supply Chain. L'analisi dell'impatto sulla decisione di *reshoring* ha, infatti, confermato che la vicinanza ai clienti unita alla flessibilità di progettazione sono i principali vantaggi dell'adozione della tecnologia. Tuttavia, i benefici presentati nel seguente lavoro sono principalmente di natura teorica. Nel capitolo 6, infatti, è mostrato come solo 8 decisioni di *reshoring* su 728 analizzate sono direttamente collegate all'adozione della fabbricazione additiva. Attualmente esistono numerosi limiti che impediscono il suo pieno sfruttamento. Il passaggio da una produzione di massa a una personalizzazione di massa, sempre più richiesto dal mercato, è ancora ostico a molte società. Questo, di fatto, rappresenta uno dei

---

principali ostacoli sul piano aziendale, poiché richiederebbe una rettifica del modello di business e dell'intera organizzazione interna della società. In aggiunta, la scarsa conoscenza da parte di progettisti e ingegneri limita l'applicazione alla sola prototipazione rapida non considerandola adatta per la produzione vera e propria. Oltre a ciò, esistono numerosi limiti tecnici; se, infatti, da una parte la fabbricazione permette la realizzazione di forme geometriche complesse, dall'altra la limitata gamma di materie prime e l'assenza di standard dei processi non consente l'adozione nella fase produttiva. In aggiunta, anche l'attuale costo delle macchine risulta essere un ostacolo rilevante. In conclusione, per poter acquisire competenze e dar vita ad una progressiva integrazione dell'AM nelle attività, la proposta in questa sede è che un'azienda attui una strategia iniziale vantaggiosa quale la collaborazione con aziende leader del settore AM e Università che facciano da guida nel processo.

## **8.1 Limitazioni della ricerca e spunti futuri**

Noto l'elevato grado di innovazione dell'argomento trattato, sono state riscontrate alcune limitazioni durante la stesura dell'elaborato. Il primo limite è stato la difficoltà nell'individuazione di casi di studio reali. Sono poche, infatti, le aziende che hanno integrato le tecniche della fabbricazione additiva nella fase di produzione e nella maggior parte dei casi, l'implementazione non ha causato modifiche sostanziali della Supply Chain. Inoltre, altre limitazioni riguardano il lavoro di ricerca preliminare per alcuni argomenti trattati, nello specifico *reshoring* e sostenibilità sociale, poiché, attualmente, queste tematiche sono poche approfondite in letteratura.

Considerando i numerosi vantaggi teorici dell'implementazione della tecnologia additiva nelle attività produttive, la ricerca futura potrebbe partire dal dimostrare l'applicabilità delle soluzioni proposte in diversi ambiti industriali. Nello specifico, sarebbe interessante valutare gli effetti positivi e negativi dell'adozione della fabbricazione additiva in settori differenti da quello dei pezzi di ricambi, l'unico che ad oggi è ampiamente discusso in letteratura. Un altro spunto su cui concentrarsi è il monitoraggio delle decisioni di *reshoring* da parte delle imprese per comprendere se in futuro, la riduzione dei costi e una migliore conoscenza della tecnologia additiva potrebbe spingere le aziende a riallocare la produzione nei Paesi d'origine. Inoltre, si potrebbe approfondire il nuovo ruolo del cliente all'interno della Supply Chain e il concetto di Demand Chain analizzato nel capitolo introduttivo.

---

Infine, si potrebbe esaminare l'impatto della pandemia, dovuta al Covid-19, sulla diffusione dell'AM, in particolare in ambito sanitario.

---

## Bibliografia

- [1] Benita M Beamon, «Supply chain design and analysis:: Models and methods,» *International Journal of Production Economics*, 1998.
- [2] [Online]. Available: <http://www.logisticsworld.com/logistics.htm>.
- [3] «[www.logisticaefficiente.it](http://www.logisticaefficiente.it),» [Online]. Available: <https://www.logisticaefficiente.it/simco/supply-chain/management/supply-chain-spiegazione.html>.
- [4] Chopra S., Meindl R. , Supply Chain Management, Strategy, Planning and Operation, London, 2015.
- [5] Christopher M., Logistics and Supply Chain Management, London, 1992.
- [6] Martin Christopher, Denis Towill , «An integrated model for the design of agile supply chains,» *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* , 2001.
- [7] Womack J.P., Jones D.T., Daniel Roos, The Machine That Changed The World, New York, 1990.
- [8] Ohno T., Toyota production system: Beyond large-scale production, Portland, 1988.
- [9] Womack J.P., Jones D.T, Lean Thinking:Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation, New York, 1996.

- 
- [10] 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.
- [11] Lee H.L., «The triple-A supply chain,» *Harvard Business Review*, 2004.
- [12] Christopher M., «The Agile Supply Chain: Competing in Volatile Markets,» *Industrial Marketing Management* , 2000.
- [13] Martin Christopher, Lynette J. Ryals, «The Supply Chain Becomes the Demand Chain,» *Journal of Business Logistics*, 2014.
- [14] Luciano Fratocchi, Guido Nassimbeni, Andrea Zanoni, Alessandro Ancarani, «Manufacturing Back-shoring: A Research Agenda for an Emerging Issue in International Business,» in *37th European International Business Academy Annual*, Bucharest, Romania, 2011.
- [15] Steffen Kinkel, Spomenka Maloca, «Drivers and antecedents of manufacturing offshoring and backshoring—A German perspective,» *Journal of Purchasing and Supply Management*, 2014.
- [16] Claire Joubioux, Evelyne Vanpoucke , «Towards right-shoring: a framework for off- and re-shoring decision making,» in *Operations Management Research*, 2016.
- [17] Lisa M. Ellram, «Offshoring, Reshoring and the Manufacturing Location Decision,» *Journal of Supply Chain Management*, 2013.
- [18] Luciano Fratocchi , Alessandro Ancarani , Paolo Barbieri , Carmela Di Mauro , Guido Nassimbeni , Marco Sartor , Matteo Vignoli , Andrea Zanoni , «Motivations of manufacturing reshoring: an interpretative framework,» *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 2016.
- [19] 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.

- 
- [20] Wendy L.Tate, Lisa M.Ellram, Tobias Schoenherr, Kenneth J.Petersen, «Global competitive conditions driving the manufacturing location decision,» *Business Horizons*, 2014.
- [21] Camera dei deputati, «MOZIONI CONCERNENTI INIZIATIVE VOLTE A FAVORIRE IL RIENTRO DELLE IMPRESE ITALIANE CHE HANNO DELOCALIZZATO LA PRODUZIONE ALL'ESTERO,» 2018.
- [22] «Uni CLUB MoRe back-reshoring».
- [23] «obamawhitehouse,» [Online]. Available: <https://obamawhitehouse.archives.gov/the-press-office/2012/01/25/fact-sheet-president-obama-s-blueprint-support-us-manufacturing-jobs-dis>.
- [24] Charles W. Hull, Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography, 1986.
- [25] ASTM F2792-12, «Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies,» (*Withdrawn 2015*) *ASTM International*, 2012.
- [26] Simon Ford, Letizia Mortara, Tim Minshall, «The Emergence of Additive Manufacturing,» 2016.
- [27] [Online]. Available: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/additive-manufacturing-process/>.
- [28] L. Iuliano, *Materiale didattico: Introduzione all'Additive Manufacturing*, 2017.
- [29] «additivemanufacturingindia,» [Online]. Available: <https://additivemanufacturingindia.blogspot.com/2018/04/cad-conversion-and-stl-file-in-additive.html>.
- [30] «ElectroYou,» [Online]. Available: <https://www.electroyou.it/meccanismocomplesso/wiki/la-prototipazione-rapida>.
- [31] Pulak Mohan Pandey, N. Venkata Reddy, Sanjay G. Dhande, «Slicing procedures in layered manufacturing:a review,» *Rapid Prototyping Journal*, 2003.
-

- 
- [32] Alberto Boschetto, Veronica Giordano, Francesco Veniali , «3D roughness profile model in fused deposition modelling,» *Rapid Prototyping Journal*, 2013.
- [33] P.M. Pandey, N.V. Reddy , S.G. Dhande , «Real time adaptive slicing for fused deposition modelling,» *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2003.
- [34] [Online]. Available: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Adaptive\\_slicing\\_\(1\).png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Adaptive_slicing_(1).png).
- [35] [Online]. Available: <https://www.makepartsfast.com/choosing-finishing-method-additive-manufacturing/>.
- [36] Lloyd Hackel, Jon R. Rankin, Alexander Rubenchik, Wayne, E. King, Manyalibo Matthews, «Laser peening: A tool for additive manufacturing post-processing,» in *Additive Manufacturing*, 2018, pp. 67-75.
- [37] Mariano Jiménez, Luis Romero , Iris A. Domínguez, María del Mar Espinosa, Manuel Domínguez, «Additive Manufacturing Technologies: An Overview about 3D Printing Methods and Future Prospects,» *Complexity* , 2019.
- [38] Nannan Guo, Ming C. Leu , «Additive manufacturing: Technology, applications and research needs,» *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2013.
- [39] Syed A.M. Tofail, Elias P. Koumoulos, Amit Bandyopadhyay, Susmita Bose, Lisa O'Donoghue, Costas Charitidis, «Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities,» *Materials Today*, 2018.
- [40] Ming Li, Wenchao Du, Alaa Elwany, Zhijian Pei, Chao Ma, «BINDER JETTING ADDITIVE MANUFACTURING OF METALS: A LITERATURE REVIEW,» in *Proceedings of the ASME 2019 14th International Manufacturing Science and Engineering Conference*, Erie, PA, USA, 2019.
- [41] «additively,» [Online]. Available: <https://www.additively.com/en/learn-about/binder-jetting>.
-

- 
- [42] Mohsen Ziaee, Nathan B. Crane, «Binder jetting: A review of process, materials, and methods,» *Additive Manufacturing*, 2019.
- [43] «3dhubs,» [Online]. Available: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-binder-jetting-3d-printing/#what>.
- [44] «AMFG,» [Online]. Available: <https://amfg.ai/2019/07/03/metal-binder-jetting-all-you-need-to-know/>.
- [45] Amir Mostafaei, Amy M. Elliott, John E. Barnes, Fangzhou Li, Wenda Tan, Corson L. Cramer, Peeyush Nandwana, Markus Chmielus, «Binder jet 3D printing – Process parameters, materials, properties, and challenges,» *Progress in Materials Science*, 2020.
- [46] «3DEO,» [Online]. Available: <https://www.3deo.co/metal-3d-printing/metal-additive-manufacturing-am-processes-binder-jetting/>.
- [47] «additively,» [Online]. Available: <https://www.additively.com/en/learn-about/binder-jetting#read-advantages>.
- [48] «EngineeringPRODUCTdesign,» [Online]. Available: <https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/binder-jetting/>.
- [49] Xiaoyi Guan, Yaoyao Fiona Zhao, «Modeling of the laser powder-based directed energy deposition process for additive manufacturing: a review,» *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020.
- [50] S.L. Sing, C.F. Tey, J.H.K. Tan, S. Huang, Wai Yee Yeong, «3D printing of metals in rapid prototyping of biomaterials: Techniques in additive manufacturing,» in *Rapid Prototyping of Biomaterials Techniques in Additive Manufacturing*, 2020.
- [51] Chang-Jun Bae, Alisha B. Diggs, Arathi Ramachandran, «Quantification and certification of additive manufacturing materials and processes,» in *Additive Manufacturing: Materials, Processes, Quantifications and Applications*, 2018, pp. 181-213.
-

- 
- [52] Michael Molitch-Hou, «Overview of additive manufacturing process,» in *Additive Manufacturing: Materials, Processes, Quantifications and Applications*, 2018, pp. 1-38.
- [53] Gary P. Halada and Clive R. Clayton, «The Intersection of Design, Manufacturing, and Surface Engineering,» in *Handbook of Environmental Degradation of Materials*, 2018, pp. 397-422.
- [54] Joel C. Najmon, Sajjad Raeisi, Andres Tovar, «Review of additive manufacturing technologies and applications in the aerospace industry,» in *Additive Manufacturing for the Aerospace Industry*, 2019, pp. 7-31.
- [55] «ADDITIVE MANUFACTURING,» [Online]. Available: <https://www.additivemanufacturing.media/blog/post/additive-manufacturing-with-material-extrusion>.
- [56] B. Satyanarayana, Kode Jaya Prakash, «Component Replication Using 3D Printing Technology,» in *2nd International Conference on Nanomaterials and Technologies*, 2014.
- [57] Yee Ling Yap, Chengcheng Wang, Swee Leong Sing, Vishwesh Dikshit, Wai Yee Yeong, Jun Wei, «Material jetting additive manufacturing: An experimental study using designed metrological benchmarks,» *Precision Engineering*, 2017.
- [58] [Online]. Available: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-material-jetting-3d-printing/#work>.
- [59] «3DPrinting.com,» [Online].
- [60] [Online]. Available: <https://amfg.ai/2018/06/29/material-jetting-3d-printing-guide/>.
- [61] engineeringproductdesign, [Online]. Available: <https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/material-jetting/>.
- [62] Yi Zhang, William Jarosinski, Yeon-Gil Jung, Jing Zhang, «Additive manufacturing processes and equipment,» in *Additive Manufacturing: Materials, Processes, Quantifications and Applications*, 2018, pp. 39-51.
-

- 
- [63] R. Goodridge, S. Ziegelmeier, «Powder bed fusion of polymers,» in *Laser Additive Manufacturing: Materials, Design, Technologies, and Applications*, 2017, pp. 181-204.
- [64] «PrimaAdditive,» [Online]. Available: <https://www.primaadditive.com/it/il-processo-powder-bed-fusion/>.
- [65] «ISO/ASTM 52900: 2015 (en), Additive manufacturing — General principles — Terminology», International Organization for Standardization (ISO), 2015.
- [66] «EngineeringProductdesign,» [Online]. Available: <https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/sheet-lamination/>.
- [67] [Online]. Available: <https://fab.cba.mit.edu/classes/865.18/additive/sheet-lamination-lom/index.html>.
- [68] «CANADA MAKES DESIGN. BUILD. EXPLORE.,» [Online]. Available: <http://canadamakes.ca/what-is-sheet-lamination/>.
- [69] João Fiore Parreira Lovo, Italo Leite de Camargo, Rogério Erbereli, Mateus Mota Morais, Carlos Alberto Fortulan, «Vat Photopolymerization Additive Manufacturing Resins: Analysis and Case Study,» *SciELO Analytics*, 2020.
- [70] «SIEMENS,» [Online]. Available: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/it/our-story/glossary/vat-photopolymerization/53338#>.
- [71] « CANADA MAKES DESIGN. BUILD. EXPLORE.,» [Online]. Available: <http://canadamakes.ca/what-is-vat-photopolymerization/>.
- [72] Gibson I., Rosen D. W., and Stucker B, *Additive Manufacturing Technologies*, 2010.
- [73] Amit Bandyopadhyay, Susmita Bose, «Additive Manufacturing,» 2015, pp. 9-11.
- [74] Eleonora Atzeni, Luca Iuliano, Paolo Minetola, Alessandro Salmi , «Redesign and cost estimation of rapid manufactured plastic parts,» *Rapid Prototyping Journal*, 2010.
-

- 
- [75] «MICROSCOPIA.IT,» [Online]. Available: <http://www.microscopiaelettronica.dabanco.it/tecnologia-additive-manufacturing>.
- [76] T.S. Srivatsan, T.S. Sudarshan, « Additive Manufacturing: Innovations, Advances, and Applications,» 2015, pp. 24-26.
- [77] Tanisha Pereira, John VKennedy, Johan Potgieter, «A comparison of traditional manufacturing vs additive manufacturing, the best method for the job,» *Procedia Manufacturing*, 2019.
- [78] Alessandro Busachi, John Erkoyuncu, Paul Colegrove, Filomeno Martina, Chris Watts, Richard Drake, «A review of Additive Manufacturing technology and Cost Estimation techniques for the defence sector,» *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2017.
- [79] Christian Weller, Robin Kleer, Frank T. Piller, «Economic implications of 3D printing: Market structure models in light of additive manufacturing revisited,» *International Journal of Production Economics*, 2015.
- [80] M. Ruffo, R. Hague, «Cost Estimation for Rapid Manufacturing — Simultaneous Production of Mixed Components Using Laser Sintering,» *Journal of Engineering Manufacture*, 2007.
- [81] N. Hopkinson, P. Dickens, «Analysis of Rapid Manufacturing—Using Layer Manufacturing Processes for Production,» *Journal of Mechanical Engineering Science*, 2003.
- [82] Mark Cottleer, «3D opportunity for production: Additive manufacturing makes its (business) case,» *Deloitte Review Issue 15*, 2014.
- [83] Mohsen Attaran, «The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing,» *Business Horizons*, 2017.
- [84] M. D. Monzón, Z. Ortega, A. Martínez, F. Ortega , «Standardization in additive manufacturing: activities carried out by international organizations and projects,» *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology volume*, 2015.
-

- 
- [85] «AMFG,» [Online]. Available: <https://amfg.ai/2018/10/19/developing-3d-printing-standards-where-are-we-today/>.
- [86] «Wikipedia,» [Online]. Available: [https://it.wikipedia.org/wiki/National\\_Institute\\_of\\_Standards\\_and\\_Technology](https://it.wikipedia.org/wiki/National_Institute_of_Standards_and_Technology).
- [87] NIST, «Measurement Science for Additive Manufacturing».
- [88] «America Makes,» [Online]. Available: <https://www.americamakes.us/>.
- [89] «3Dprint.com,» [Online]. Available: <https://3dprint.com/218069/am-standards-roadmap-version-2/>.
- [90] America Makes & ANSI Additive Manufacturing Standardization Collaborative (AMSC), «Standardization Roadmap for Additive Manufacturing,» 2018.
- [91] «ASTM International,» [Online]. Available: <https://www.astm.org/standardization-news/?q=features/5-most-important-standards-additive-manufacturing-.html>.
- [92] «tctmagazine,» [Online]. Available: <https://www.tctmagazine.com/blogs/guest-column/standards-additive-manufacturing-latest-developments-astm/>.
- [93] «aicq,» [Online]. Available: <https://aicqna.it/2016/10/21/iso-e-astm-international-svelano-la-struttura-per-produrre-standard-internazionali-in-ambito-additive-manufacturing/>.
- [94] «ASTM,» 2017. [Online]. Available: [www.astm.org/COMMIT/F42\\_AMStandardsStructureAndPrimer](http://www.astm.org/COMMIT/F42_AMStandardsStructureAndPrimer).
- [95] Shahir Mohd Yusuf, Samuel Cutler, Nong Gao, «Review: The Impact of Metal Additive Manufacturing on the Aerospace Industry,» *Metals*, 2019.
- [96] «optics.org,» [Online]. Available: <https://optics.org/news/9/3/27>.
- [97] «AIRBUS,» [Online]. Available: <https://www.airbus.com/newsroom/press-releases/en/2017/09/first-titanium-3d-printed-part-installed-into-serial-production-.html>.
-

- 
- [98] Ian Gibson, «The changing face of additive manufacturing,» *Journal of Manufacturing Technology Management*, 2017.
- [99] Shruti Ganesh Sarvankar, Sanket Nandaram, Yewale, «Additive Manufacturing in Automobile Industry,» *INTERNATIONAL JOURNAL OF RESEARCH IN AERONAUTICAL AND MECHANICAL ENGINEERING*, 2019.
- [100] «SPI Lasers,» [Online]. Available: <https://www.spilasers.com/news/recent-advances-audi-use-additive-manufacturing/>.
- [101] «motorssport.com,» [Online]. Available: <https://it.motorsport.com/fl/news/ferrari-nuove-leghe-di-alluminio-nella-testata-in-additive-manufacturing/4314252/>.
- [102] «Tomografia industriale,» [Online]. Available: <https://tomografiaindustriale.com/perche-la-tomografia-industriale/ricambi-auto-in-additive-manufacturing/>.
- [103] «BMWGROUP.COM,» [Online]. Available: <https://www.bmwgroup.com/en/company/bmw-group-news/artikel/additive-manufacturing.html>.
- [104] «IL BREVETTO,» [Online]. Available: <https://www.ilbrevetto.news/2019/04/03/xev-in-arrivo-la-prima-auto-italo-cinese-costruita-con-le-stampanti-3d/>.
- [105] «XEV,» [Online]. Available: <https://www.x-ev.net/>.
- [106] Flaviana Calignano , Manuela Galati , Luca Iuliano, Paolo Minetola, «Design of Additively Manufactured Structures for Biomedical Applications: A Review of the Additive Manufacturing Processes Applied to the Biomedical Sector,» *Journal of Healthcare Engineering* , 2019.
- [107] Anna Aimar, Augusto Palermo, Bernardo Innocent, «The Role of 3D Printing in Medical Applications: A State of the Art,» *Journal of Healthcare Engineering*, 2019.

- 
- [108] A. De La Pena, J. De La Pena-Brambila, J. Perez-De La Torre, M. Ochoa, M. J. Gallardo, «Low-cost customized cranioplasty using a 3D digital printing model: a case report,» *3D Printing in Medicine*, 2018.
- [109] Mukul Ramola, Rakesh Jain, Vinod Yadav, «On the adoption of additive manufacturing in healthcare: a literature review,» *Journal of Manufacturing Technology Management*, 2018.
- [110] «informapress,» [Online]. Available: <https://informa-press.it/biostampa-3d-nuova-frontiera/>.
- [111] Jeffrey I. Lipton, Meredith Cutler, Franz Nigl, Dan Cohen, Hod Lipson, «Additive manufacturing for the food industry,» *Trends in Food Science & Technology*, 2015.
- [112] «Mold,» [Online]. Available: <https://thisismold.com/process/cook/3d-printed-candy-katjes-magic-candy-factory#.X2hLRZMzZQI>.
- [113] «Barilla,» [Online]. Available: <https://www.barillagroup.com/it/comunicati-stampa/la-pasta-del-futuro-%C3%A8-stampata-3d>.
- [114] «FOOD,» [Online]. Available: <https://www.foodweb.it/2019/02/e-commerce-barilla-pasta-3d/>.
- [115] «<https://blurhapsody.com>,» [Online].
- [116] Harm-Jan Steenhuis, Xin Fang, Tolga Ulusemre, «Strategy in 3D Printing of Food,» in *PICMET*, 2018.
- [117] N. Nachal, J. A. Moses, P. Karthik, C. Anandharamakrishnan, «Applications of 3D Printing in Food Processing,» *Food Engineering Reviews*, 2019.
- [118] «CORRIERE DELLA SERA,» [Online]. Available: [https://www.corriere.it/tecnologia/cyber-cultura/13\\_maggio\\_23/cibo-stampato-3d\\_73d9befe-c389-11e2-8072-09f5b2e9767e.shtml](https://www.corriere.it/tecnologia/cyber-cultura/13_maggio_23/cibo-stampato-3d_73d9befe-c389-11e2-8072-09f5b2e9767e.shtml).
- [119] «IL Replicatore,» [Online]. Available: <https://www.replicatore.it/musei-fondazioni-e-istituzioni-cosi-la-stampa-3d-salvuarda-il-patrimonio-artistico/>.
-

- 
- [120] «Stampa 3D Facile,» [Online]. Available: <https://www.stampa3dfacile.it/stampa-3d-al-museo-come-viene-utilizzata/>.
- [121] «STAMPARE IN 3D,» [Online]. Available: <http://www.stamparein3d.it/alice-martin-larte-e-il-futuro-della-stampa-3d-nei-musei/>.
- [122] «artemagazine,» [Online]. Available: <http://www.artemagazine.it/curiosita/item/2023-statu-a-di-zeus-a-olympia-di-fidia-riprodotta-con-stampante-3d-video>.
- [123] «hisour.com,» [Online]. Available: <https://www.hisour.com/it/applications-of-3d-printing-40727/>.
- [124] «il progettista industriale,» [Online]. Available: <https://www.ilprogettistaindustriale.it/lantica-statu-ellenica-di-zeus-riprodotta-in-3d-con-resine-termoplastiche/>.
- [125] «3Dprintingcreative,» [Online]. Available: <https://www.3dprintingcreative.it/arte-stampata-in-3d-la-collezione-ikebana-rocknroll/>.
- [126] «IL REPLICATORE,» [Online]. Available: <https://replicatore.wordpress.com/2015/03/26/alla-scoperta-degli-incredibili-alberi-stampati-dellartista-inglese-michael-winstone/>.
- [127] [Online]. Available: <https://www.wewomengineers.com/innovazione-tecnologia/la-tecnologia-che-sogna-in-grande-immaginarpuoi/>.
- [128] [Online]. Available: <https://www.joshharker.com/>.
- [129] Tatjana Spahiu, Erald Piperi, Andrea Ehrmann, Henrique A. Almeida, Rita M. T. Ascenso, Liliana C. Vitorino, «3D Printing: An Innovative Technology for Customised Shoe Manufacturing,» in *Progress in Digital and Physical Manufacturing*, 2019.
- [130] «3D4growth,» [Online]. Available: <https://3d4growth.com/stampa-3d-vestiti-ge-additive-protolabs-zac-posen>.
-

- 
- [131] «Medaarch,» [Online]. Available: <https://www.medaarch.com/al-met-gala-unvestito-a-petali-di-rosa-stampato-in-3d/31972>.
- [132] Kony Chatterjee, Tushar K. Ghosh, «3D Printing of Textiles: Potential Roadmap to Printing with Fibers,» *Advanced Materials*, 2019.
- [133] Dereje Berihun Sitotaw, Dustin Ahrendt, Yordan Kyosev, Abera Kechi Kabish, «Additive Manufacturing and Textiles—State-of-the-Art,» *Applied Sciences*, 2020.
- [134] «Footballnerds,» [Online]. Available: <https://www.footballnerds.it/adidas-futurecraft-3d-la-scarpa-e-stampata/>.
- [135] Frank Cooper, «Sintering and additive manufacturing: “additive manufacturing and the new paradigm for the jewellery manufacturer”,» *Progress in Additive Manufacturing*, 2016.
- [136] Telma Ferreira, Paulo J. Bártolo, Henrique A. Almeida, Ian Campbell, «ADDITIVE MANUFACTURING IN JEWELLERY DESIGN,» in *ESDA2012*, Nantes, 2012.
- [137] «SPI Lasers,» [Online]. Available: <https://www.spilasers.com/application-additive-manufacturing/additive-manufacturing-in-the-jewellery-industry/>.
- [138] «mycase,» [Online]. Available: [https://www.mycase.it/news/innovazione\\_\\_tecnologia/la-stampa-3d-rivoluzionaledilizia/](https://www.mycase.it/news/innovazione__tecnologia/la-stampa-3d-rivoluzionaledilizia/).
- [139] «guidafinestra,» [Online]. Available: <https://www.guidafinestra.it/case-stampate-in-3d-e-il-turno-dei-cinesi-10-in-un-giorno/>.
- [140] Daniel Delgado Camacho, Patricia Clayton, William J.O' Brien, Carolyn Seepersad, Maria Juenger, Raissa Ferron, Salvatore Salamone, «Applications of additive manufacturing in the construction industry – A forward-looking review,» *Automation in Construction*, 2018.
- [141] «3dwasp,» [Online]. Available: <https://www.3dwasp.com/case-costruite-con-stampante-3d/>.
-

- 
- [142] «builtworlds,» [Online]. Available: <https://builtworlds.com/news/inside-first-3d-printed-office-building/>.
- [143] Ans Al Rashid, Shoukat Alim Khan, Sami G. Al-Ghamdi, Muammer Koç, «Additive manufacturing: Technology, applications, markets, and opportunities for the built environment,» *Automation in Construction*, 2020.
- [144] Barry Berman, «3-D printing: The new industrial revolution,» *Business Horizons*, 2012.
- [145] Marcel Bogers, Ronen Hadar, Arne Bilberg, «Additive manufacturing for consumer-centric business models: Implications for supply chains in consumer goods manufacturing,» *Technological Forecasting and Social Change*, 2016.
- [146] Jan Holmström, Jouni Partanen, Jukka Tuomi, Manfred Walter, «Rapid manufacturing in the spare parts supply chain,» *Journal of Manufacturing Technology Management Journal of Manufacturing Technology Management*, 2010.
- [147] Samuel H. Huang, Peng Liu, Abhiram Mokasdar, Liang Hou, «Additive manufacturing and its societal impact: a literature review,» *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013.
- [148] A. Barz, T. Buer, H.-D. Haasis, «A Study on the Effects of Additive Manufacturing of Supply Manufacturing,» *IFAC-PapersOnLine*, 2016.
- [149] NIST, «Costs and Cost Effectiveness of Additive Manufacturing».
- [150] Konstantinos Tziantopoulos, Naoum Tsolakis, Dimitrios Vlachos, Loukas Tsironis, «Supply chain reconfiguration opportunities arising from additive manufacturing technologies in the digital era,» *Production Planning & Control*, 2019.
- [151] Daniel R. Eyers, Andrew T. Potter, «E-commerce channels for additive manufacturing: an exploratory study,» *Journal of Manufacturing Technology Management*, 2014.
- [152] Stephen Mellor, Liang Hao, David Zhang, «Additive manufacturing: A framework for implementation,» *International Journal of Production Economics*, 2014.
-

- 
- [153] Katrin Oettmeier, Erik Hofmann, «Impact of additive manufacturing technology adoption on supply chain management processes and components,» *Journal of Manufacturing Technology Management*, 2016.
- [154] Peng Liu, Samuel H Huang, Abhiram Mokasdar, Heng Zhou, Liang Hou , «The impact of additive manufacturing in the aircraft spare parts supply chain: supply chain operation reference (scor) model based analysis,» *Production Planning & Control*, 2013.
- [155] Siavash H.Khajavi, Jouni Partanen, Jan Holmström, «Additive manufacturing in the spare parts supply chain,» *Computers in Industry* , 2014.
- [156] Manfred Walter, Jan Holmström, Hannu Yrjölä, «Rapid manufacturing and its impact on supply chain management,» in *Logistics Research Network Annual Conference*, Dublin, 2004.
- [157] Alessandro Ancarani, Carmela Di Mauro, Francesco Mascali, «Backshoring strategy and the adoption of Industry 4.0: Evidence from Europe,» *Journal of World Business*, 2019.
- [158] Luciano Fratocchi, «Is 3D Printing an Enabling Technology for Manufacturing Reshoring?,» *Reshoring of Manufacturing*, 2017.
- [159] «la Repubblica,» [Online]. Available: <https://www.repubblica.it/economia/affari-e-finanza/>.
- [160] «adidas.it,» [Online]. Available: <https://www.adidas.it/adidasrunners/blog/i-valori-della-nostra-community?consent-level=2>.
- [161] «3Dprint.com,» [Online]. Available: <https://3dprint.com/261544/the-adidas-speedfactory-a-hyped-up-failure-or-a-supply-chain-success/>.
- [162] «OpenInnovation,» [Online]. Available: <https://openinnovation.startupitalia.eu/53516-20160531-adidas-robot-germania-industria-4-0>.
-

- 
- [163] «ASSEMBLY,» [Online]. Available: <https://www.assemblymag.com/articles/92930-reshoring-in-the-real-world>.
- [164] «The Denver Post,» [Online]. Available: <https://www.denverpost.com/2012/10/12/manufacturing-bouncing-back-as-u-s-colorado-companies-reshore-jobs/>.
- [165] «3Dprint.com,» [Online]. Available: <https://3dprint.com/127920/otterbox-stratasys-j750/>.
- [166] «3dadept.com,» [Online]. Available: <https://3dadept.com/otterbox-releases-cad-imagine-design-and-create-your-own-accessory/>.
- [167] «3Dprint.com,» [Online]. Available: <https://3dprint.com/185338/otterbox-releases-universe-cad/>.
- [168] G.H. Brundtland, «Our Common Future,» Oxford, 1987.
- [169] Mélanie Despeisse, Simon Ford, «The Role of Additive Manufacturing in Improving Resource Efficiency and Sustainability,» in *IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems*, 2015.
- [170] Simon Ford, Mélanie Despeisse, «Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges,» *Journal of Cleaner Production*, 2016.
- [171] C. Villamil, J. Nylander, S. I. Hallstedt, J. Schulte, M. Watz, «ADDITIVE MANUFACTURING FROM A STRATEGIC SUSTAINABILITY PERSPECTIVE,» in *INTERNATIONAL DESIGN CONFERENCE - DESIGN 2018, DUBROVNIK*, 2018.
- [172] Giuseppe Ingarao, Paolo C.Priarone, «A comparative assessment of energy demand and life cycle costs for additive- and subtractive-based manufacturing approaches,» *Journal of Manufacturing Processes*, 2020.
- [173] Abby Ghobadian, Irene Talavera, Arijit Bhattacharya, Vikas Kumard, Jose Arturo Garza-Reyes, Nicholas O'Regan, «Examining legitimatisation of additive
-

---

manufacturing in the interplay between innovation, lean manufacturing and sustainability,» *International Journal of Production Economics*, 2020.

- [174] Karel Kellens, Martin Baumers, Timothy G. Gutowski, William Flanagan, Reid Lifset, Joost R. Duflou, «Environmental Dimensions of Additive Manufacturing,» *Journal of Industrial Ecology*, 2017.
- [175] «3dsystems.com,» [Online]. Available: <https://www.3dsystems.com/blog/2014/06/ekocycle-cuber-3d-printer-remake-using-recycled-plastic-bottles>.
- [176] «sustainablebd.com,» [Online]. Available: <https://www.sustainablebd.com/case-study-caterpillar-remanufactured-and-rebuilt-products>.
- [177] David Rejeski, Fu Zhao, Yong Huang, «Research needs and recommendations on environmental implications of additive manufacturing,» *Additive Manufacturing*, 2018.
- [178] Paolo C. Priarone, Giuseppe Ingarao, «Towards criteria for sustainable process selection: On the modelling of pure subtractive versus additive/subtractive integrated manufacturing approaches,» *Journal of Cleaner Production*, 2017.
- [179] Campbell T., Williams C., Ivanova O., Garret B., «Could 3D Printing Change the World? Technologies, Potential, and Implications of Additive Manufacturing,» in *Atlantic Council*, Washington, 2011.
- [180] Florinda Matos, Radu Godina, Celeste Jacinto, Helena Carvalho, Inês Ribeiro, Paulo Peças, « Additive Manufacturing: Exploring the Social Changes and Impacts,» *Sustainability*, 2019.
- [181] Malte Gebler, Anton J.M. Schoot Uiterkamp, Cindy Visser, «A global sustainability perspective on 3D printing technologies,» *Energy Policy*, 2014.