

**Politecnico di Torino**

**Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale**



**Tesi di Laurea Magistrale**

**“Impatto dell’Additive Manufacturing sulla Supply Chain”**

**Relatore**

Prof. Carlo Rafele

**Candidato**

Luca Rovei

**Anno accademico 2023/2024**



## Ringraziamenti

*“A tutte le supereroine e a tutti i supereroi che mi hanno preso per mano nell’ora più buia, perché come dice Ted Lasso: “Non c’è cosa peggiore di essere tristi, tranne l’essere tristi e soli” e grazie a voi non sono mai stato solo.”*

# Indice

<b>Capitolo I</b> .....	<b>1</b>
<b>Cos'è la Supply Chain?</b> .....	<b>1</b>
Obiettivi della supply chain.....	3
Fondamenti della Supply Chain .....	6
Ruolo dell'ICT all'interno della supply chain.....	12
<b>Capitolo II</b> .....	<b>15</b>
<b>Additive Manufacturing</b> .....	<b>15</b>
Tipologia di fabbricazione additiva .....	18
Selective Laser Sintering.....	20
Selective Laser Melting.....	21
Electronic Beam Melting .....	22
3 Dimensional Printing .....	23
Stereolitografia.....	24
Polyjet.....	26
Multi-jet Modelling.....	27
Drop on Demand.....	28
Laminate Object Manufacturing.....	30
Fused Deposition Modelling .....	31
Direct Energy Deposition.....	32
<b>Capitolo III</b> .....	<b>34</b>
<b>Applicazioni e analisi del settore AM</b> .....	<b>34</b>
Analisi economica settore AM .....	34
Il settore AM italiano .....	39

Applicazioni per tecniche di produzione .....	41
<b>Capitolo IV .....</b>	<b>45</b>
<b>L'impatto dell'AM sulla SC .....</b>	<b>45</b>
Struttura classica SC nella manifattura .....	45
Come l'AM cambia la SC .....	49
Impatto sulle metriche della SC .....	60
<b>Capitolo V .....</b>	<b>71</b>
<b>L'AM e la SC nei vari settori.....</b>	<b>71</b>
Settore medico .....	72
Settore automotive .....	79
Settore aerospace .....	85
Settore energetico.....	91
Specializzazione o produzione di massa ? .....	95
Investimenti futuri.....	97
<b>Capitolo VI .....</b>	<b>100</b>
<b>AM e sostenibilità .....</b>	<b>100</b>
Definizione e analisi.....	100
Caso titanio .....	107
Emissioni sulla supply chain .....	111
Innovazioni sostenibili .....	114
<b>Discussioni e conclusioni .....</b>	<b>118</b>
<b>Bibliografia .....</b>	<b>126</b>

## **Abstract**

L'elaborato "Impatto dell'additive manufacturing sulla Supply Chain" descrive e analizza quelle che sono e potranno essere le conseguenze dell'introduzione dell'Additive Manufacturing all'interno delle Supply Chain del settore manifatturiero. Il lavoro analizza nei primi tre capitoli la materia, oggetto della discussione: cos'è la Supply Chain, cos'è l'Additive Manufacturing, quali sono le sue caratteristiche, le sue diverse tecnologie e un'analisi settoriale sullo stato del settore, i vari campi di applicazione e le sue prospettive di crescita. Dal quarto capitolo, l'analisi si sposta sul comprendere l'effetto dei cambiamenti dell'Additive Manufacturing sulla Supply Chain: questo viene fatto in maniera più generica all'interno del capitolo IV, descrivendo i possibili cambiamenti all'interno della Supply Chain. All'interno del capitolo V, vengono analizzati i cambiamenti e le sue potenzialità con casi relativi a 4 settori principali di applicazione (medico, automotive, aerospace ed energetico). L'ultimo capitolo invece tratta e approfondisce quali siano le potenzialità a livello di sostenibilità che potrebbe portare l'Additive Manufacturing all'interno delle Supply Chain del settore manifatturiero. L'elaborato si pone dunque come obiettivo quello di analizzare quelli che sono i cambiamenti attuali e quelli possibili futuri portati dall'Additive Manufacturing nella Supply Chain del settore manifatturiero, evidenziando i benefici e i limiti, confrontando le varie tipologie di strutture introdotte e provando a capire quali siano le possibilità di evoluzione futura del settore. Come metodologia di lavoro e di ricerca per la realizzazione e stesura dell'elaborato, sono stati consultati articoli e pubblicazioni di letteratura scientifica inerenti all'argomento, sitografia aziendale per i dati tecnici ed economici e bibliografia settoriale.

# Introduzione

Nel 2020 con la pandemia da Covid-19, il mondo si è trovato ad affrontare una sfida senza precedenti dal punto di vista sanitario: una sfida a livello sanitario che è andata di pari passo con quella avvenuta in ambito logistico, dove l'interruzione forzata dell'attività in numerosi ambiti produttivi ha causato numerose interruzioni e problematiche all'interno delle Supply Chain di tutto il mondo. In un settore come quello medico è stata necessario sin da subito riuscire a riorganizzare in breve tempo la propria catena logistica di approvvigionamento di prodotti, in molti casi fondamentali per la sopravvivenza stessa del paziente. In questa situazione di emergenza, la tecnologia dell'Additive Manufacturing è stata adottata dal settore medico per riuscire a rispondere alle interruzioni della Supply Chain e alla necessità di produrre prodotti con un alto grado di personalizzazione in breve tempo. Questa situazione ha dato un nuovo impulso allo sviluppo di questa tecnologia che aveva conosciuto una grande popolarità all'inizio degli anni '10, ma il cui sviluppo si era arrestato a metà dello scorso decennio, poiché il settore manifatturiero non aveva ancora le competenze necessarie per accogliere una tecnologia del genere. Questo nuovo impulso è continuato anche dopo il Covid-19, tanto è vero che nel maggio 2022 la Casa Bianca ha lanciato un piano di aiuti assieme a 5 grandi aziende del settore, per aiutare la diffusione dell'additive manufacturing presso le piccole-medie imprese al fine di aumentare la resilienza delle loro SC. Alla luce di questo, lo scopo di questo lavoro è indagare quali siano i possibili impatti futuri di questa introduzione dell'AM all'interno della SC, in alcuni casi già avvenuta: comprendere a livello qualitativo quali siano i cambiamenti possibili, i possibili vantaggi e le possibili problematiche, provando a trovare conferme di queste trattazioni con analisi quantitative, casi studio e dati aziendali. Come metodo di ricerca per la stesura dell'elaborato, sono stati consultati articoli e pubblicazioni di letteratura scientifica inerenti all'argomento, sitografia aziendale per i dati tecnici ed economici e bibliografia settoriale. Si è

ricercato all'interno delle principali piattaforme scientifiche per parole chiave come "supply chain", "additive manufacturing" in tutte le ricerche, unite alle varie parole chiave per i vari temi ricercati: ad esempio gli articoli consultati nella parte di sostenibilità sono stati cercati inserendo come parola chiave "sustainability", oltre a quelle già citate in precedenza.



# Capitolo I

## Cos'è la Supply Chain?

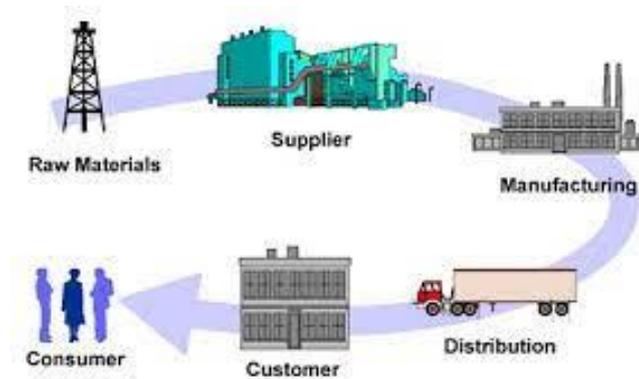
L'espressione Supply Chain Management (SCM) vuole indicare una serie di attività gestionali per la gestione e il controllo dei flussi di merci, dati e finanze relativi a un prodotto o servizi, partendo dall'acquisizione delle materie prime fino alla destinazione finale del prodotto; questa rete di individui e aziende che sono impegnate nel creare il prodotto e consegnarlo al cliente prende il nome di Supply Chain (SC).

La letteratura si è concentrata negli anni nel definire la differenza tra Supply Chain Management e Logistics Management, arrivando a quattro diverse interpretazioni:

- **Traditionalist:** la SCM secondo questa visione viene considerata come una piccola parte della logistica; in particolare per questa posizione si identifica la SCM come una logistica speciale esterna all'azienda o logistica inter-organizzativa.
- **Re-Labeling:** la logistica e la SCM in questa ottica vengono considerate la stessa cosa. Secondo questa definizione, la SCM non è altro che una rietichettatura della logistica; quella che un tempo veniva considerata logistica, ora è SCM. In letteratura è la definizione più usata, anche se restringe l'ambito della SCM alla sola logistica.
- **Unionist:** secondo questa prospettiva la logistica fa parte della SCM; viene vista come quella parte della gestione della SCM che pianifica, implementa e controlla il flusso di andata e ritorno e lo stoccaggio efficiente ed efficace di beni, servizi e informazioni correlate tra il punto di origine e il punto di consumo per soddisfare i requisiti dei clienti. Nonostante non sia la più usata, viene considerata dagli addetti ai lavori come la più corretta.

- **Intersectionist:** questa interpretazione suggerisce una distinzione netta tra logistica e supply chain management, che però non trova molto consenso tra gli addetti ai lavori (Sweeney et al,2017).

Le macro-fasi in cui si articola la supply chain sono:



*Figura 1: fasi supply chain*

- **Previsione della domanda:** essa è fondamentale per riuscire ad avere la quantità minima di inventario che permetta di soddisfare gli ordini ricevuti nel lasso di tempo desiderato dal cliente. La previsione è stata implementata nel corso degli anni dall' Inventory Management System (IMS) che permette di avere una previsione più rapida e più accurata nell'intervallo di tempo desiderato.
- **Procurement:** per procurement si intendono tutta la serie di scelte svolte per approvvigionarsi del materiale necessario dai propri fornitori, come la scelta del fornitore, della tipologia di contratto, del mezzo di trasporto e del momento di consegna nel proprio magazzino per avere sempre la giusta quantità al suo interno.
- **Fulfillment:** questa fase comprende tutte le operazioni messo in atto per arrivare alla soddisfazione finale del cliente attraverso la consegna. Questo riguarda dapprima lo storage del singolo prodotto in una particolare area del magazzino, identificata da un QRcode, in modo da essere raggiungibile per le successive operazioni di picking e packaging, preparando l'ordine che dovrà essere consegnato al cliente.

- **Delivery:** questa fase comprende le scelte gestionali riguarda alla consegna del prodotto finale al cliente. Le scelte in questione sono relative alla tipologia di corriere, al decidere l'esternalizzazione o meno delle consegne, e alla gestione della last-mile delivery. Tutte queste attività devono mirare alla soddisfazione nel cliente nel tempo da lui richiesto.
- **Returns (resi):** l'ultima fase della supply chain riguarda la gestione dei resi, ovvero tutti quegli ordini consegnati, ma restituiti dal cliente; da sottolineare come sia una quantità che sta crescendo nel corso degli anni e che quindi sia un aspetto di cui le aziende dovranno sempre più tenere presente nel corso degli anni (Fernando, 2024).

Dalle descrizioni di queste fasi si deduce quali siano le principali scelte strategiche a cui è deputato il supply chain manager:

- ubicazione e la capacità produttiva degli impianti
- capacità di stoccaggio del magazzino
- modalità e qualità del trasporto
- tipologia del sistema informativo utilizzata per lo scambio di informazioni lungo la catena. Riguardo a questo ultimo punto, è indispensabile che tutte le fasi abbiano tra di loro una condivisione di informazioni e di feedback, per far in modo che si efficienti continuamente la Supply Chain.

## **Obiettivi della supply chain**

Le scelte descritte precedentemente vengono prese all'interno di una strategia aziendale, con l'intenzione di perseguire due obiettivi, per creare una supply chain efficiente:

- Riduzione dei costi: il target aziendale è quello di diminuire le voci di costo di trasporto, di approvvigionamento, di magazzino, per avere un prodotto il più concorrenziale possibile sul mercato.
- Aumento della soddisfazione del cliente: l'obiettivo consiste nel riuscire ad avere la maggior soddisfazione del cliente possibile, migliorando la qualità del servizio percepita dal cliente.

Queste due funzioni obiettivo vengono considerate all'interno delle scelte strategiche ed è compito del supply chain manager decidere quale delle due privilegiare; se si vuole privilegiare la riduzione dei costi, modellerà una supply chain efficiente, mentre nel caso di voler prediligere la soddisfazione del cliente si costruirà una supply chain reattiva pronta a rispondere velocemente ai flussi, provocando inevitabilmente un aumento di costi.

		Demand uncertainty	
		Low (functional products)	High (innovative products)
Supply uncertainty	Low (stable process)	Efficient supply chains	Responsive supply chains
	High (evolving process)	Risk-hedging supply chains	Agile supply chains

Figura 2: matrice supply uncertainty vs demand uncertainty

Questi scenari sono due situazioni estreme che si configurano la prima con prodotti altamente funzionali la cui domanda è facile da prevedere e con una supply chain priva di rischi, mentre per il secondo caso si applica a prodotti innovativi con elevati picchi della domanda e una supply chain con più rischi di interruzione (es. microchip prodotti in Cina). A questi scenari, vanno aggiunti altri due modelli di supply chain, una definita a copertura del rischio e una Agile; la prima si modella per prodotti indifferenziati e funzionali, che hanno una domanda prevedibile, ma che non possono avere interruzioni della catena di fornitura come nel caso della fornitura di luce e gas. La seconda, invece,

prevede una risposta veloce al cambio della domanda (es. settore del fast fashion) senza però in questo caso modellarsi per interruzioni della linea di fornitura come nello scenario reactive.

Il supply chain manager, in base a questi scenari presenti in letteratura e in base ai bisogni del suo cliente, andrà a costruire una supply chain il più possibile vicina alle richieste del cliente. Per realizzare ciò, è necessario che avvenga uno scambio di informazioni il più rapidamente e chiaramente possibile da valle della catena (cliente) a monte (produttore). Se l'azienda non riesce a comprendere i bisogni del cliente e a non adattarsi strategicamente ad essi, rischia di fallire i propri obiettivi. Diventa quindi fondamentale per la realizzazione della strategia aziendale, avere piena conoscenza dell'incertezza della domanda e delle preferenze del cliente.

I parametri da individuare e da analizzare per comprendere questi aspetti sono:

- a. Riconoscimento del fabbisogno del segmento del cliente da servire;
- b. Quantità di prodotto necessario in ogni lotto;
- c. Tempo di risposta tollerato dal cliente;
- d. Varietà dei prodotti necessari;
- e. Livello di servizio richiesto;
- f. Prezzo del prodotto;
- g. Tasso di innovazione del prodotto richiesto;
- h. Attributi generali della domanda del cliente;
- i. Incertezza della domanda del cliente per un determinato prodotto;

La scelta strategica, derivante dall'analisi di questi parametri, deve essere conforme con le analisi sull'incertezza della domanda e sulle preferenze del cliente; è evidente che la decisione sulla supply chain da adottare sarà sempre una soluzione di compromesso rispetto ai modelli presentati in precedenza (Angkiriwang, 2015).

## Fondamenti della Supply Chain

I driver della Supply Chain che i manager variano per formulare il loro piano strategico sono sei e possono essere identificati in tre driver logistici( strutture, inventario e trasporti) e tre driver inter-funzionali ( sistema informatico, make or buy e strategia dei prezzi). Le scelte eseguite dal supply chain manager su questi driver portano ad avere ripercussioni sull'efficienza e sulla reattività di tutta la catena (Chopra, 2019).

- **Strutture:** Nell'ambito della supply chain, per strutture vengono definite le locazioni dove il prodotto viene immagazzinato, assemblato e fabbricato. Le scelte che vengono formulate dal manager sulle strutture riguardano la posizione, la dimensione e la flessibilità di esse; le decisioni prese andranno a costruire una supply chain più reattiva o più efficiente. Prendiamo ad esempio un'azienda che rifornisce negozi nel settore dell'abbigliamento. La prima scelta a cui è chiamato il supply chain manager è quella di decidere sulla posizione e sulla dimensione dei siti di stoccaggio; un numero elevato di siti di stoccaggio consentirà all'azienda di avere una reazione immediata ai bisogni del cliente e riducendo l'attesa del cliente. D'altra parte, se l'azienda decidesse di concentrare le giacenze in poche strutture, andrebbe incontro a tempi d'attesa più lunghi per il cliente, privilegiando l'efficienza andando a diminuire i costi di gestione.

Inoltre, il manager è chiamato a scegliere anche su altri aspetti, quale la posizione e la relativa distanza dei siti di stoccaggio dai negozi dei clienti e dalla sede centrale stessa; una maggiore vicinanza aiuta alla sede centrale ad avere un maggiore controllo sui vari siti e un più veloce ed efficace scambio di informazioni tra le parti. La figura del manager dovrà anche tenere conto della capacità di espansione dei siti nel tempo per fronteggiare un aumento della domanda, e della necessità di rinnovare i siti di fronte a un invecchiamento, analizzando il trade-off tra costo dell'investimento e capacità di reazione futura ai cambiamenti nella catena logistica (Chopra,2019).

- **Inventario:** Per inventario si intende un luogo all'interno dei siti di stoccaggio, dedicato all'immagazzinamento delle materie prime, dei semilavorati e dei prodotti

finiti. La discrepanza tra domanda e offerta e la variabilità della domanda stessa, rende necessaria la presenza di un inventario; è importante avere un inventario nel momento in cui lo stoccaggio di materie prime e semi-lavorati consente di ottenere economie di scala o nel caso dei prodotti finiti per fronteggiare la variabilità della domanda.

Seguendo l'esempio precedente, l'azienda che gestisce la distribuzione di magliette potrà inviare grandi quantità di tessuto ai siti di produzione sfruttando in questo modo le economie di scale ; per fare questa operazione dovrà considerare l'aumento dei costi di gestione e di inventario, tenendo conto anche del costo opportunità del capitale non sfruttato. Il manager dovrà quindi prendere una decisione sulla frequenza e sulla quantità di riordino; un'altra scelta sarà quella di decidere il livello di scorte di sicurezza desiderato. Il livello delle scorte di sicurezza è correlato al livello di servizio che l'azienda vuole offrire al cliente. Per livello di servizio si intende la frazione di clienti che si riescono a soddisfare grazie alla presenza di scorte di sicurezza. Il livello di servizio può essere fissato a priori facendo variare il prezzo della merce oppure viene determinato tenendo conto del prezzo della merce e del prezzo dello stock-out (Chopra, 2019).

- **Trasporti:** per trasporto si intende tutte le attività mirate alla movimentazione della merce del sito di stoccaggio fino al cliente finale; in questo ambito le scelte che dovrà operare il supply chain manager sono relative al trasporto da utilizzare, alla scelta delle mete da raggiungere e al delineare le rotte da utilizzare. Le scelte che opera il supply chain manager a livello di trasporti influenzano anche la posizione dei siti di stoccaggio e devono essere coerenti con le necessità del cliente. Ad esempio, se i nostri clienti fossero disposti a pagare per un livello di servizio più alto, il manager potrebbe decidere di migliorare la velocità della sua logistica, lavorando sul driver dei trasporti; un miglioramento legato non solo al driver trasporti, ma anche al driver strutture è la decentralizzazione dei siti di produzione e stoccaggio per avere trasporti più brevi verso il cliente. Se questo non è possibile oppure se si vuole potenziare ancora di più la velocità, si può lavorare sulla tipologia dei trasporti scegliendo spedizioni più veloci, che di conseguenza saranno anche più costose. Nel caso in cui il cliente non sia disposto

ad accettare un livello di servizio alto e privilegi il costo, le decisioni relative ai trasporti e alle strutture saranno volte a un efficientamento della linea. I clienti tendono a privilegiare un livello di servizio alto, e quindi le scelte dei manager si concentrano più sull'aumentare la reattività della filiera; la sfida a cui sono chiamati è un continuo aumento della reattività, senza andare a peggiorare l'efficienza della catena logistica e portando ad un miglioramento dal punto di vista dei costi. La metodologia più utilizzata per migliorare la velocità della risposta al cliente è la pianificazione congiunta che viene applicata in due differenti modalità: la prima è quella di esternalizzare i trasporti, ovvero stipulare dei contratti con un'azienda di terza parte per la consegna del prodotto finito. La seconda è la cooperazione orizzontale e consiste in accordi tra aziende di pari dimensioni, per una distribuzione congiunta e contemporanea delle merci, impiegando le medesime rotte per distribuire i prodotti finiti (Chopra,2019).

- **Informazioni:** Negli ultimi decenni, è aumentata l'attenzione all'interno delle organizzazioni aziendali, per comprendere quali sono i veri bisogni e le vere necessità dell'azienda per riuscire ad innovarsi e a migliorarsi; è fondamentale che queste informazioni vengano prese in modo corretto senza distorsioni per portare un miglioramento reale all'interno dell'organizzazione. I clienti e i fornitori sono gli attori più significativi all'interno della filiera, da cui l'azienda deve raccogliere le informazioni; solo in questo modo l'organizzazione può andare a servire in maniera sempre più efficiente il cliente e ad essere realmente vicino alle sue esigenze. L'azienda ha differenti metodi per andare ad ottenere le informazioni dai clienti e dai fornitori. La regola più utilizzata è la regola 80/20 che consiste nel raccogliere le informazioni dai clienti definiti più significativi; questi rappresentano il 20 per cento dei clienti, che portano 80% del fatturato. Un altro metodo consiste nell'interpellare e cercare informazioni dai propri clienti e fornitori che adottano uno stesso servizio/prodotto, ma con applicazioni differenti al loro interno. Per processare e raccogliere queste informazioni, l'azienda deve essere strutturata al suo interno con enti che si occupino della loro raccolta. I dipartimenti interni all'azienda che si occupano di queste sono il dipartimento marketing, servizio clienti e il personale addetto alle vendite; l'azienda

può anche rivolgersi ad agenzie esterne che provvederanno ad acquisire informazioni sui clienti e fornitori dell'organizzazione. Tutte queste informazioni vengono raccolte e poi trasmesse ai sistemi informativi informatici dell'organizzazione, solitamente sistema Enterprise Resource Planning (ERP); essi sono ormai diventati fondamentali per una corretta condivisione dell'informazione lungo tutta la filiera produttiva (Chopra,2019).

- **Make or buy:** questo aspetto è inerente alla gestione dei fornitori all'interno di una catena di approvvigionamento. L'organizzazione si trova davanti alla scelta di esternalizzare tutte o una parte delle attività oppure tenerle all'interno delle mura aziendali. Si riscontrano due tipi diversi di esternalizzazione: una è l'esternalizzazione vera e propria, dove avviene il trasferimento delle attività operative a società esterne, mentre l'altra prende il nome di outsourcing, in cui vengono trasferiti attività e servizi a società esterne. I vantaggi che porta un'esternalizzazione sono una riduzione e abbattimento dei costi operativi, sfruttando le economie di scala, un maggior impiego delle proprie risorse per altri scopi, una miglior condivisione dei rischi. Se non attuata correttamente l'esternalizzazione può portare a rischi per l'azienda in quanto si potrebbe lavorare con un fornitore poco affidabile oppure avere una distorsione dell'informazione lungo la supply chain; diventa quindi necessario prima di prendere questa decisione scegliere con accuratezza i propri fornitori e strutturarsi lungo la catena per evitare di perdere informazioni che come abbiamo visto prima sono uno dei driver per assicurare una buona performance alla catena logistica. Prendendo in esempio la nostra azienda nel settore dell'abbigliamento, una decisione del supply chain manager potrebbe essere quella di spostare la produzione in un paese del sud-est asiatico al fine di abbattere i costi di produzione per aumentare il profitto; l'azienda potrebbe così concentrarsi nell'investire le proprie risorse nel marketing e nell'efficientamento della propria catena distributiva (Chopra,2019).

- **Strategia di prezzo:** l'ultimo driver che deve analizzare il supply chain manager è il prezzo del prodotto finito; il prezzo non rimane lo stesso per la durata del ciclo di vita del prodotto, ma a secondo del periodo dovrà essere adattato. Come nel caso della

supply chain si è di fronte a un trade-off anche nella decisione del prezzo; da una parte un prezzo alto può portare ad una massimizzazione del mark-up, ma rischia di non garantire un numero di vendite adeguato, mentre d'altro canto un prezzo troppo basso, potrebbe portare a un elevato numero di vendite, con un mark-up insufficiente. Trovare il giusto prezzo che massimizzi profitto e vendite è fondamentale, poiché i ricavi derivanti dal prezzo devono coprire tutti i costi della catena. Si individuano cinque differenti tipologie di prezzo che possono essere impiegate, a seconda delle condizioni esterne o interne all'organizzazione (Chopra,2019).



*Figura 3: matrice strategia di prezzo*

**a) Prezzo di penetrazione del mercato:** per prezzo di penetrazione si intende una strategia di prezzo che viene impiegato nella fase di vita di lancio di un prodotto e consiste nell'adottare un prezzo notevolmente inferiore media per attirare attenzione sul proprio prodotto, penetrando la maggior quota di mercato possibile. Questa strategia inizialmente porterà ad avere un grande numero di clienti, ma a causa di un prezzo basso potrebbe causare una notevole perdita per la supply chain. L'azienda, osservando perdite nonostante gli alti volumi, potrebbe decidere di aumentare i prezzi

per riallinearsi al mercato; in caso di guadagno con prezzi bassi, l'impresa potrà continuare a mantenerli, mantenendo però sempre volume elevati.

**b) Prezzo di scrematura del mercato:** questa soluzione aziendale è il contrario della precedente; si decide di impiegare un prezzo molto elevato nel momento del lancio del prodotto per cercare di massimizzare i guadagni sui primi clienti. Successivamente questa tecnica prevede di abbassare il prezzo per cercare di raggiungere i clienti più sensibili alla variazione di prezzo. Il manager deve valutare in questo caso che l'aumento dei costi di produzione iniziale a causa delle minori quantità prodotte, non deve essere maggiore del margine di produzione generato dall'aumento di prezzo.

**c) Prezzo "Premium":** è una strategia che viene impiegata stabilendo prezzi maggiori rispetto ai competitor; la sua adozione avviene nella prima fase del ciclo di vita del prodotto. Il buon esito della strategia dipende da come viene percepito il prodotto dal mercato; se considerato di maggiore qualità, allora la strategia risulta vantaggiosa per l'organizzazione. Solitamente viene impiegata da piccole medie-imprese poiché i costi di produzione con volumi minori sono maggiori, e quindi si cerca di ottenere profitto con un prezzo più elevato.

**d) Prezzo di economia:** questo metodo è il contrario di quello visto in precedenza, con le aziende che adottano per i loro beni/servizi un prezzo molto basso al momento del lancio per riuscire a ottenere la parte di clienti più sensibile ai cambiamenti di prezzo. È una strategia che è utilizzabile da aziende di grandi dimensioni ( settore alimentare e discount) che sono in grado di garantire alti volumi, minimizzando i costi di produzione di marketing.

**e) Prezzo di pacchetti di prodotti (Bundle):** è una soluzione basata sulla vendita di pacchetti composti da prodotti diversi; il prezzo del pacchetto acquistato ha per il cliente un costo inferiore rispetto all'acquisto dei singoli prodotti singolarmente. Solitamente all'interno di questi pacchetti vengono inseriti prodotti che non hanno molto mercato e che occupano spazio all'interno dell'azienda; in questo modo i manager riescono sia a garantire alla loro organizzazione più spesso sia ad aumentare

il valore percepito dai clienti dell'azienda in quanto hanno la percezione di ricevere qualcosa gratuitamente (Janse, 2019).

## **Ruolo dell'ICT all'interno della supply chain**

La diffusione e lo sviluppo delle nuove tecnologie (ICT) hanno avuto un impatto fondamentale nell'evoluzione industriale degli ultimi anni. Queste innovazioni hanno aiutato a migliorare e ad efficientare la catena logistica, permettendo una migliore gestione dell'inventario e un aumento del livello di servizio.

Esternamente alla catena produttiva, la più grande innovazione sviluppatasi negli ultimi decenni è l'e-commerce, che ha permesso alle aziende di arrivare facilmente a milioni di clienti in tutto il mondo grazie a questa forma di business via internet. Dalla sua introduzione le aziende hanno cercato di rendere l'esperienza dell'e-commerce sempre più vicina a quella vissuta nell'acquisto in un negozio reale. Inizialmente con l'introduzione dell'e-commerce si parlava di multicanalità, ovvero per il cliente era possibile arrivare al prodotto con modalità diverse ( e-commerce, acquisto in negozio), ma queste modalità rimanevano separate tra loro: l'azienda sceglieva il canale su cui puntare e su cui massimizzare le proprie vendite. Negli ultimi anni, le supply chain si stanno orientando verso l'omnicanalità, ovvero di garantire la stessa esperienza indipendentemente dal canale; in questo caso i canali aziendali lavorano in sinergia tra di loro, e condividono i dati per offrire al cliente la modalità che preferisce. L'obiettivo finale è la mass customization ossia una vendita di massa con la possibilità in base al tipo di cliente il bene ed il servizio o anche la modalità di vendita stessa. Per fare ciò e per condividere questa grande quantità dati vengono usati software denominati Customer Relationship Management (CRM). Nell'esperienza di acquisto si è sviluppato nei clienti il desiderio di conoscere il percorso dei propri prodotti; è ormai comune trovare in molti beni venduti QRcode, che scansionati permettono al cliente di

visionare l'intera filiera produttiva che ha dovuto attraversare il bene acquistato. Il vantaggio per l'azienda nell'utilizzo del QRcode è duplice sia come valore percepito dal cliente, sia perché l'azienda al tempo stesso controlla tutti i passaggi del prodotto all'interno della propria filiera produttiva e ha informazioni in tempo reale sui propri prodotti: i dati sulla movimentazione e lo stoccaggio di questi prodotti vengono elaborati e gestiti dai software Internal Supply Chain Management (ISCM).

Un corretto scambio di informazioni non è importante solo con i clienti, ma anche con le altre organizzazioni aziendali con cui l'azienda si interfaccia nella propria supply chain, come ad esempio i propri fornitori; in questo ambito l'introduzione dello Electronic Data Interchange (EDI), ha introdotto una comunicazione interaziendale più efficace attraverso l'utilizzo di documenti business in formato standard. Ha portato questo una condivisione di una grande quantità di documenti come ordini, fatture in tempo molto breve con una bassa percentuale di errori rispetto ai formati cartacei.

Dal punto di vista della gestione dei magazzini, l'introduzione del barcode prima e poi delle tecnologie Radio-Frequency Identification (RFID), han portato migliori performance degli stessi, in termini di accuratezza del conteggio e di tracciabilità del prodotto; a livello di magazzino, l'introduzione degli Stock Keeping Unit (SKU), ovvero di unita di carico predefinite con annessi sistemi di controllo, ha permesso un costante progresso nella facilità di movimentazione delle merci.

Con l'introduzione di software in grado di ottimizzare le rotte in tempo reale, si è reso possibile un efficientamento nell'ambito dei trasporti garantendo un abbattimento dei costi di trasporto, un aumento della produttività e una capacità di reazione in tempo-reale agli imprevisti del trasporto (traffico, incidenti, code), grazie alla capacità di questi sistemi di ricalcolare continuamente la rotta in tempo reale. In questo ambito l'attenzione delle società si è concentrata negli ultimi anni nell'impiego di sistemi GPS per il tracciamento continuo della merce che viene trasportata; i vantaggi di questa tecnologia non sono solo quelli visti precedentemente, ma anche la possibilità di offrire

al cliente un migliore servizio con l'opportunità per il cliente di visionare costantemente la posizione della sua merce.

All'interno dell'intera filiera, queste tecnologie e questi software visti precedentemente devono essere messi in comunicazione, garantendo uno scambio di informazioni corretto e non una perdita di esse. Per fare questo, è necessario che in una supply chain avvenga prima la digitisation, ovvero l'ottenimento del dato digitale dal dato analogico, e poi la digitalisation, ossia l'utilizzo di questi dati in processi digitali più grandi che ne permettano anche l'analisi; senza questi passaggi, è inutile disporre delle tecnologie viste in precedenza. Ad esempio, prendendo a riferimento le 5 macro-fasi della supply chain, dall'acquisto dal fornitore alla consegna e al pagamento con il cliente, ognuno dei dati generati da esse deve essere caricato su un sistema informatico locale, che a sua volta deve essere integrato con il sistema globale; questi dati devono essere poi condivisi a un livello più alto, dando la possibilità ai top manager di vederli e gestirli. Come visto in precedenza nell'analisi del driver informazione, rimane importante che i dati e i documenti trattati abbiano sempre lo stesso criterio, offrendo una stabilità informativa lungo tutta la catena.

Per la sicurezza e l'utilizzo delle transazioni aziendali più significativi, un'ulteriore innovazione avuta negli ultimi anni è quella della blockchain. La blockchain consiste nella creazione di un libro mastro virtuale, all'interno del quale alcune registrazioni vengono bloccate e registrate permanentemente; consente quindi di registrare le transazioni tra le due parti aziendali coinvolte in modo sicuro e permanente. Questa registrazione sicura e permanente permette di eliminare la figura degli intermediari che prima erano chiamati come terze parti fidate per registrare, coordinare e verificare le transazioni tra le parti. Al momento lo sviluppo della blockchain è rallentato dalla presenza di numerosi inventari diversi e da diversi protocolli di comunicazione che rendono difficoltose le transazioni. Il carico sulla rete dato dalla conservazione dei dati e l'elevato consumo energetico ostacolano ulteriormente la diffusione di questa tecnologia (Zhang et al,2023).

# Capitolo II

## Additive Manufacturing

Per fabbricazione additiva, si intende una tecnica di produzione che permette la realizzazione di manufatti, partendo da modelli matematici tridimensionali in formato Computer Aided Design (CAD), grazie alla sovrapposizione di layer di materiali, fino alla realizzazione del prodotto finito. Spesso questo tipo di fabbricazione viene denominata erroneamente stampa 3D; la stampa 3D è in realtà la denominazione commerciale di una delle numerose tecniche di fabbricazione additiva presenti sul mercato. La popolarità di questa tecnologia è esplosa verso l'inizio degli anni '10 del 2000, ma la sua invenzione non è così recente.

Le prime scoperte sulla fabbricazione additiva, si devono a Chuck Hull, un ingegnere del Colorado, che inventò nel 1982 la stereolitografia, brevettandola nel 1986, anno in cui fondò la 3dSystem, ancora oggi una delle aziende leader nel settore. In realtà, si è poi scoperto che in Giappone nel 1980, l'ingegner Todeo Kodama avesse già sperimentato una tecnica simile, con la deposizione di resine attraverso raggi UV, ma non era riuscito a brevettarla. Nello stesso periodo un gruppo composto da Carl Deckard (uno studente della Texas University), Joe Beaman (un suo professore) e Paul Forderhase, osservando le idee di Hull, iniziarono gli studi per scoprire un nuovo metodo, molto simile alla stereolitografia ma eseguito con materiali diversi: la sinterizzazione.

La grande innovazione portata dall'avvento di questa tecnologia era nel modo di produrre l'oggetto, non più per sottrazione come nel caso delle tecniche di produzione tradizionali come la tornitura o l'asportazione di truciolo, ma per addizione "layer-by-layer" ovvero strato su strato del materiale di cui sarà composto il prodotto finito (Wohlers,2015).

Per arrivare al prodotto finito, si possono individuare 6 differenti fasi di produzione: creazione del modello digitale CAD, esportazione e conversione del file in formato Standard Triangle Language (STL), verifica, stampaggio del prodotto, estrazione del prodotto, processo di post-lavorazione.



*Figura 4: schema fasi processo AM*

Si analizzino ora nel dettaglio le varie fasi:

- **Creazione del modello digitale CAD:** il primo step è creare il modello di digitale del prodotto che si vuole fabbricare, impiegando un software CAD. In seguito, viene impiegato uno scanner 3D; esso ricrea il modello e lo va a migliorare per farlo diventare da un punto di vista ingegneristico più adatto alla produzione con la stampante. Lo scanner ricava una nuvola di punti di scansione, che viene successivamente convertita in una mesh poligonale e poi esportata come corpo solido. Nella fase di progettazione del modello CAD, il progettatore deve tenere conto di alcuni vincoli per il modello digitale, come la presenza di spazi vuoti all'interno del prodotto; inoltre, il disegnatore CAD deve tenere

presente di mantenere un livello di dettaglio coerente con la complessità del modello che si vuole creare.

- **Esportazione del file in formato STL:** in questa fase del processo il modello CAD, viene convertito nel formato utilizzato dalla macchina. Il linguaggio più utilizzato è quello STL: esso divide la superficie in tanti piccoli triangoli adiacenti tra loro, per rendere il modello leggibile alla macchina. Non sempre l'esportazione del file è positiva al primo tentativo, poiché nella fase di progettazione potrebbero esserci gli errori visti in precedenza che non permettono l'esportazione.
- **Verifica del modello:** solitamente questa fase di verifica viene attivata quando si producono pezzi complessi per verificare che non ci siano spazi vuoti o fori all'interno del solido. Inoltre, i software di verifica permettono di studiare in presenza di angoli e sporgenze l'eventuale esigenza di strutture di supporto che verranno inserite durante la stampa del prodotto.
- **Stampaggio del prodotto:** come si è analizzato in precedenza, in presenza di sporgenze o di vacanze si devono inserire prima dell'inizio dello stampaggio del prodotto delle strutture di supporto che sorreggeranno il prodotto nelle prime fasi della realizzazione. Per la costruzione di queste strutture, si deve eseguire una progettazione ad hoc cercando di impiegare meno materiale possibile, in quanto dopo la realizzazione non verranno riutilizzati. Spesso vengono impiegati dei software per avere un'analisi più accurata sul posizionamento di queste strutture è necessario operare uno studio anche su quello che è il posizionamento e l'orientamento del modello; è importante sceglierlo correttamente poiché questo avrà un impatto fondamentale nella buona riuscita dello stampaggio. Solitamente si cerca di posizionare il modello, provando ad avere la maggior quantità di superficie a contatto con il piano di stampa, aumentando l'adesione superficiale. Ad esempio, se si va a stampare un oggetto piccolo con un'altezza elevata, si disporrà il modello con l'asse maggiore parallelo al piano orizzontale. Un altro aspetto per il quale è importante studiare il posizionamento del modello,

è l'orientamento della trama; per questo motivo nei prodotti finali bisogna disporre la trama lungo la direzione nella quale sarà più soggetta a sforzo fatto per il quale il progettista deve tenere conto. Dopo questo passaggio, l'ultimo passo prima dell'avvio della stampa è la generazione del G-Code, ovvero la macchina traduce il modello nei comandi che dovrà eseguire. In questa, si possono andare a definire lo spessore dei layer, la durata della stampa e il suo grado di precisione; inoltre è possibile selezionare la percentuale di riempimento della struttura interna dell'oggetto, che varia a seconda dei materiali impiegati. A questo punto viene avviata la stampa vera e propria le cui tipologie verranno analizzate nei paragrafi successivi.

- **Estrazione:** in questa fase il pezzo viene estratto dalla macchina. L'operazione può essere eseguita manualmente oppure con l'ausilio di strumenti di supporto (anche in questo caso varia a seconda delle tipologie che si affronteranno nei paragrafi successivi).
- **Processo di post-lavorazione:** dopo l'estrazione, in molti casi si esegue una fase post-lavorazione, dove si rifinisce il prodotto; anche per questa fase si analizzeranno successivamente le varie tipologie di finitura del prodotto che variano a seconda della tipologia di processo effettuato. Oltre alla finitura, vengono rimossi anche i supporti, con una rimozione che può avvenire meccanicamente o grazie all'immersione in un solvente (Vaneket et al, 2020).

## **Tipologia di fabbricazione additiva**

Come si è citato in precedenza, esistono numerose metodologie di fabbricazione additiva che si distinguono per materiali e tecniche impiegate. La prima classificazione che si opera è dividere le tecniche di fabbricazione in base ai materiali utilizzati e allo stato fisico nei quali sono lavorati. La materia che viene lavorata può essere allo stato di polvere, liquido o solido.

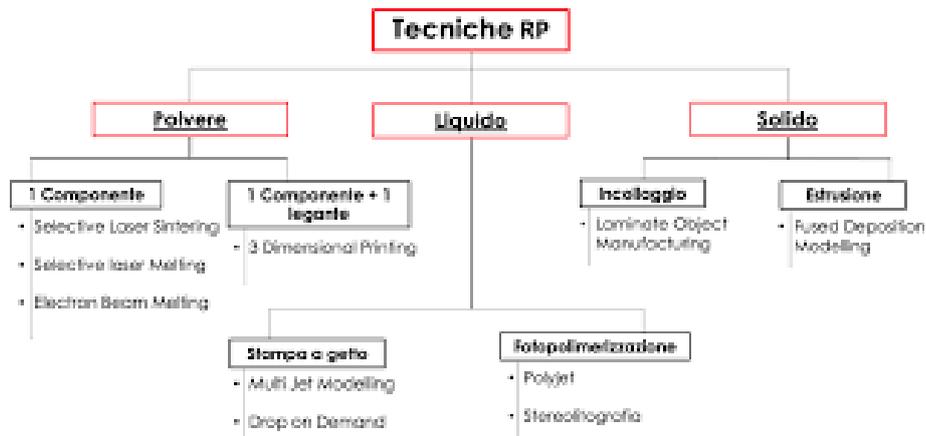


Figura 5: divisione tecnologia AM per materiale

Per quanto riguarda le polveri si impiegano sabbie metalliche ( leghe di titanio, leghe di cobalto) nella maggior parte dei casi, ma vengono utilizzati anche fibre di carbonio e alluminio. Le tecnologie più utilizzate per questa tipologia di materiali sono la Selective Laser sintering (SLS), Selective Laser Melting (SLM) e Electronic Beam Melting (EBM). Un'altra possibilità è quello di utilizzare delle polveri con legante, ovvero si impiegano delle polveri legate da polimeri cerosi; in questo modo è possibile utilizzare un metodo di estrusione da ugello simile alla stampa 3d standard.

Nel caso invece dello stato liquido, si utilizzano resine viscosi, reattive ai raggi UV, laser e aria. Spesso le resine viscosi impiegate sono dei polimeri termoindurenti, ma ci sono altre tipologie di materiali che vengono lavorati allo stato liquido; in questi casi è necessario l'utilizzo di supporti per la realizzazione del prodotto finito. La tecnica più conosciuta è la stereolitografia a cui si sono affiancate tecnologie come il Polyjet, del Multi-jet Modelling (MJM) , il Drop on demand (DOD).

Per quanto riguarda lo stato solido, i materiali impiegati vengono incollati/fusi tra di loro layer by layer. In questo caso, il risultato finale risulta spesso approssimativo e non soddisfacente per una vendita in commercio; per questo motivo le applicazioni più diffuse di queste tecnologie sono legate alla prototipazione rapida e all'utilizzo

amatoriale. Le tecnologie più diffuse sono il Laminate Object Manufacturing (LOM) e il Fused Deposition Modelling (FDM) (Singh, 2017)

## Selective Laser Sintering

La sinterizzazione laser selettiva permette di produrre prodotti finiti, utilizzando un laser ad alta potenza che sinterizza piccole particelle di polvere per arrivare alla creazione del modello finito. Viene dapprima depositato un letto di polvere all'interno della camera di stampa, dove viene riscaldato ad una temperatura poco inferiore a quella di fusione del materiale grezzo; il laser successivamente scansiona il modello 3D e riscalda la polvere alla temperatura di fusione del materiale, fondendo assieme le particelle in maniera meccanica, le quali diventano parti solide. La piattaforma successivamente si abbassa e si procede alla creazione di un nuovo strato, componendo così il prodotto finito. Dopo la fine della stampa, il modello viene raffreddato e sottoposto a finitura, spesso per eliminare la polvere in eccesso. La polvere non ancora fusa viene successivamente utilizzata come supporto e questo permette di avere un risparmio in termini di costi e di poter comporre geometrie molto complesse.

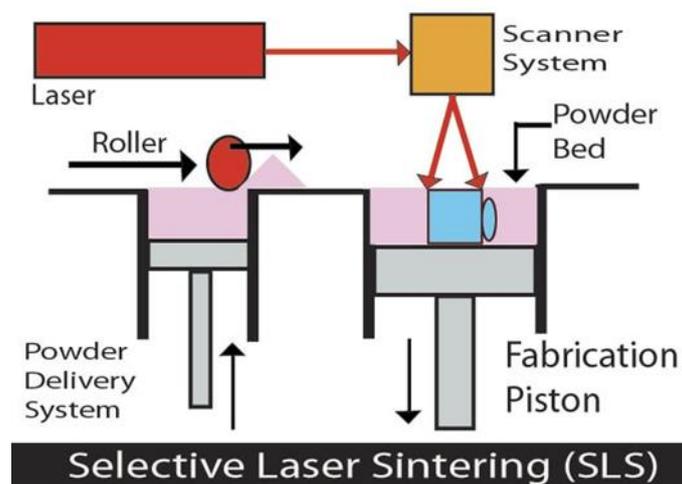
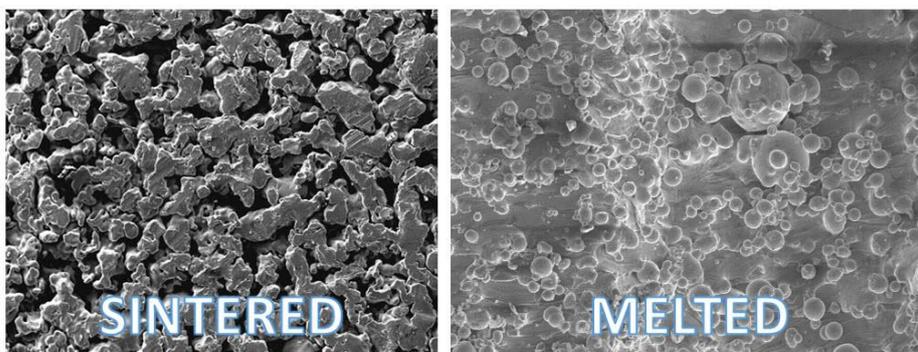


Figura 6: schema selective laser sintering

Come materiali impiegati, la SLS offre una vasta gamma di possibilità; infatti, si possono usare plastiche, metalli ( spesso devono avere un legante), combinazione di metalli, materiali compositi( ad esempio combinazioni di metalli e ceramica) e polimeri rinforzati. I prodotti ottenuti da SLS hanno elevate proprietà meccaniche, con resistenze simili a quelli creati con stampaggio iniezione; la prima grande applicazione era legata alla prototipazione rapida, ma grazie al costo per unità ridotto e all'alta produttività, si è diffusa per la produzione di accessori in piccoli lotti. Solitamente i prodotti realizzati con la SLS, hanno delle geometrie molto complesse e quindi in questi casi conviene produrre con una tecnologia additive SLS, piuttosto che produrre stampi molto costosi che verrebbero usati per una produzione limitata. I limiti che si possono riscontrare sono di mancata accuratezza del materiale a causa dell'impiego di particelle, di rischio di ossidazione che si può evitare mantenendo il processo in atmosfera di gas inerte e di alti costi, poiché bisogna riscaldare la polvere a una temperatura vicina a quella di fusione (Schmid et al, 2014).



*Figura 7: schema materiale*

## **Selective Laser Melting**

Il Selective Laser Melting (SLM) è un processo di produzione additiva sempre con letto di polvere, che presenta numerose analogie con la SLS; la differenza è nell'uso

dei materiali, in quanto la tecnologia SLM lavora solo con polveri metalliche pure e non con polveri composite. In questa applicazione, è ancora più importante la presenza di un gas inerte per evitare l'ossidazione del prodotto. Le applicazioni sono simili a quelle viste in precedenza con la SLS. A livello di processo la SLM non garantisce il riciclo delle polveri, ma ha tempi di processo più brevi rispetto alla SLS, con costi di produzioni più bassi. Essendo i grani delle polveri metalliche composite più grandi, la SLM permette di avere un processo di finitura più semplice (Konda et al, 2017).

## Electronic Beam Melting

L'Electronic Beam Melting è un processo di fabbricazione additiva a letto di polvere, dove la polvere viene fusa con un fascio di elettroni ad alta tensione, a differenza del SLS/SLM in cui si impiega il laser per la formazione del prodotto finito. Il fascio viene indirizzato verso la polvere metallica, in una camera ad alto vuoto per evitare problemi di ossidazione, con una tensione di 30-60 KV per fondere la polvere; tutto il processo viene svolto con temperature che raggiungono fino a 1000°C.

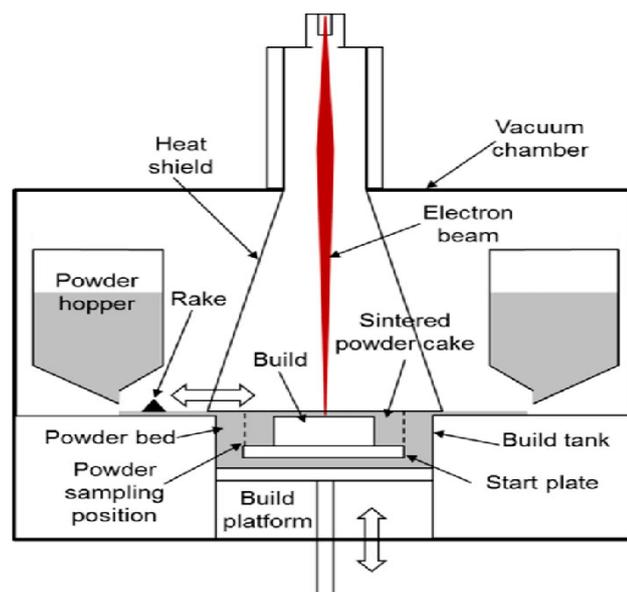


Figura 8: schema Electronic Beam Melting

Gli oggetti che vengono prodotti hanno un'elevata resistenza al calore e ottime proprietà meccaniche; per questo motivo, vengono utilizzati nel settore automotive per la produzione di turbine per i motori aerei. Un altro settore di applicazione è quello medicale dove molte protesi interne e accessori vengono realizzati con l'EBM, impiegando titanio e cromo-cobalto. I tempi di produzione sono più veloci rispetto alla SLS/SLM, ma i costi di produzione sono più elevati e a causa dei grani più ampi anche la rugosità del prodotto è peggiore rispetto alle tecniche sopracitate; un altro difetto di questa tecnologia sono i lunghi tempi di raffreddamento del prodotto, dopo lo stampaggio (Konda et al, 2017).

### 3 Dimensional Printing

Il 3Dimensional Printing è una tecnica di fabbricazione additiva a letto di polvere, dove, a differenza di quelle viste precedentemente, viene utilizzata una polvere composta da un metallo in polvere con l'aggiunta di un collante.

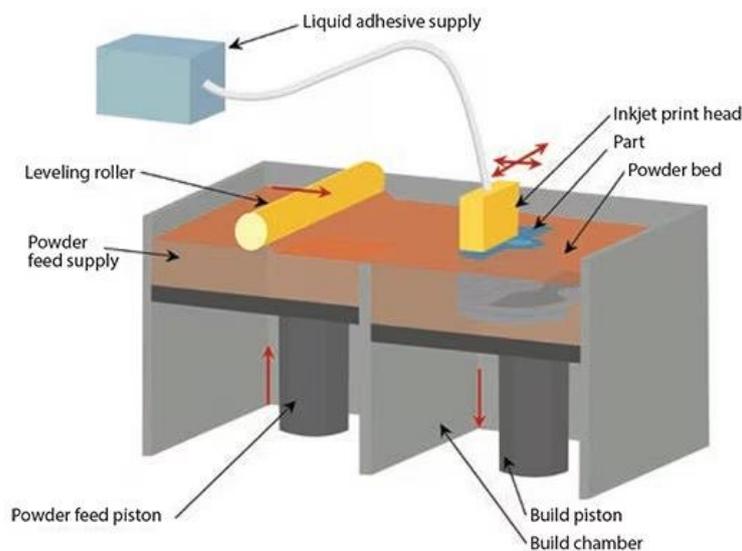


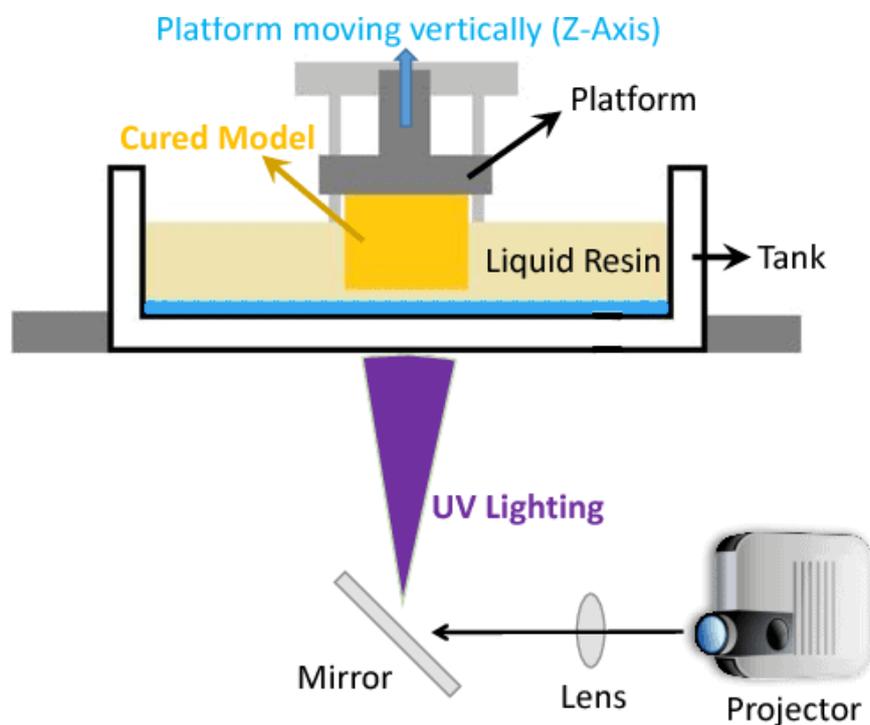
Figura 9: schema 3 Dimensional Printing

Il collante viene depositato tramite l'ausilio di un ugello sul letto di polveri metalliche; la percentuale di collante deve essere dosata in maniera corretta per evitare che lo strato di polvere affondi. Dopo aver aggregato le polveri metalliche con la colla, viene azionata una sorgente di calore per compattare ancora di più le polveri. Il pezzo viene poi messo in forno dove viene riscaldato il pezzo per far evacuare il collante; gli interstizi vuoti vengono poi riempiti grazie ad un processo di capillarità con una lega basso fondente (bronzo). Le polveri di metallo più utilizzate sono leghe di tungsteno, acciaio inossidabile e acciaio per utensili. Uno dei problemi è l'impiego di una polvere meno fine che in molti casi porta a un lungo processo di finitura dopo il processo. I vantaggi di questa tecnologia sono nei materiali impiegati più economici e nell'assenza di supporti da utilizzare; inoltre, il prodotto finito non necessita di costosi trattamenti chimici post-lavorazione.

## **Stereolitografia**

La prima tecnologia di fabbricazione additiva con la materia prima allo stato liquido che si analizza è la stereolitografia (SLA); questa viene considerata come la tecnologia che ha dato origine alla stampa 3D, grazie al brevetto di Chuck Hull e alla sua commercializzazione eseguita da 3DSystems. Questa tecnologia utilizza il principio di fotopolimerizzazione per costruire modelli 3D; i raggi UV polimerizzano (solidificano) all'interno di una vasca una resina liquida e fotosensibile. Il modello viene ancorato ad una piattaforma che scende di un livello ogni volta che i raggi UV polimerizzano uno strato della resina fotosensibile dal basso verso l'alto; lo spessore degli strati standard è 50 µm, ma per alcuni processi più accurati lo spessore arriva fino a 10 µm. Lo spessore e l'accuratezza degli strati determina la velocità del processo e il suo costo; con processi più accurati si avranno prodotti finiti migliori, ma allo stesso tempo un costo e un tempo di produzione maggiore. Il sistema descritto precedentemente è il più diffuso e prende il nome di "bottom-up", anche se si sono sviluppate dei tipi di

stampante “top-down” dove la piattaforma scende strato per strato e i raggi UV vanno dall’alto verso il basso. Durante il processo sono necessarie strutture di supporto, in modo che le sporgenze possano avere un appoggio per non cedere. Inoltre, sono necessarie numerose fasi di post lavorazione, tra cui il lavaggio della resina per rimuovere la resina in eccesso, la rimozione dei supporti e un ulteriore post-indurimento con raggi UV per solidificare ulteriormente il prodotto finito.



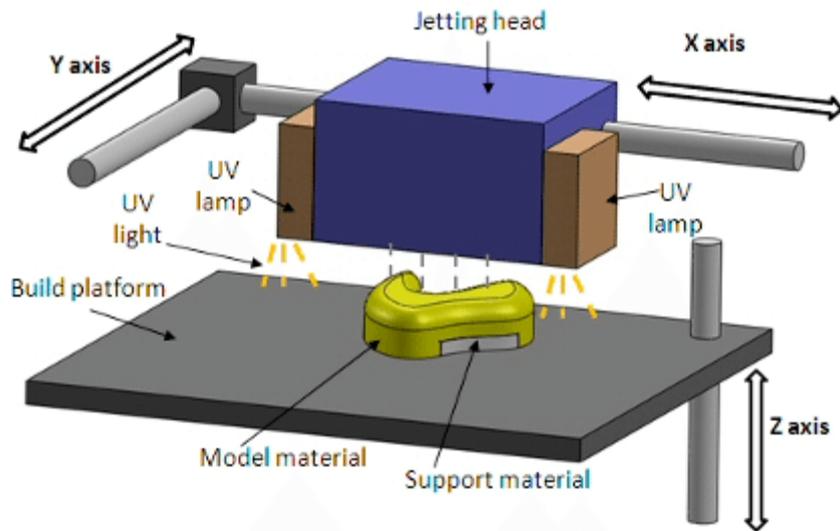
*Figura 10: schema stereolitografia*

Questa tecnologia viene richiesta nei settori dove servono oggetti con superfici lisce e ad alta precisione. I settori di applicazione sono molteplici, ma quelli principali sono l’odontoiatria e la gioielleria. Ad esempio, nella gioielleria viene usata per produrre stampi personalizzati dove viene colato il metallo, oppure per realizzare piccoli prototipi di anelli, nel caso in cui ci siano ordini di anelli personalizzati. Come materiali vengono impiegati resine standard che producono parti molto sottili, ma anche molti fragili; si usano anche resine come policarbonato, polipropilene che rendono il materiale più duraturo, ma che limitano la precisione e le geometrie dell’oggetto (Huang et al, 2020).

Una tecnologia simile alla stereolitografia è la Direct Light Position (DLP), la quale presenta gli stessi concetti di base ma con alcune differenze nella struttura della tecnologia. Viene utilizzata una lampada che illumina tutta la piattaforma, al fine di polimerizzare il prodotto; la differenza con la stereolitografia è che nella DLP, la macchina polimerizza completamente tutto lo strato, mentre la stereolitografia polimerizza lo strato, procedendo punto per punto. La differenza si nota nello spessore dello strato che è di 25-200 micron per la stereolitografia, mentre è di 5-150 micron per la DLP; a livello di costi la maggior velocità della DLP permette di avere prodotti finiti con prezzi minori, rispetto a una tecnologia SLA. Uno dei difetti della DLP è l'eventuale presenza di scalini sui prodotti finali e una perdita di qualità sui lati poiché la lampada tende a concentrare la sua energia di illuminazione nella parte centrale del prodotto finito (Chaudary et al, 2023).

## **Polyjet**

L'altra tecnologia che utilizza la fotopolimerizzazione per la fabbricazione del prodotto è la tecnologia Polyjet in cui la resina polimerizzabile viene gettata su un vassoio di stampa, mentre viene fotopolimerizzata da due lampade UV. Il processo è simile a una normale stampante a getto d'inchiostro: un ugello con le testine di stampa deposita sul vassoio la resina secondo le indicazioni del modello CAD e viene istantaneamente solidificato dalle lampade UV.



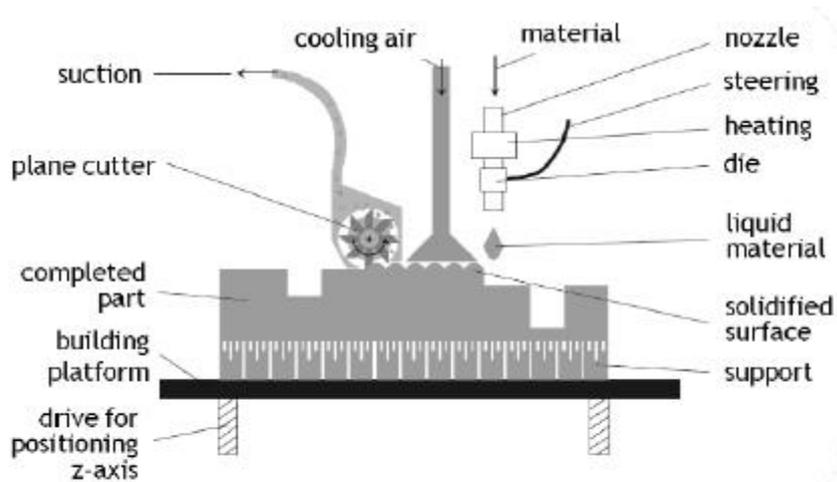
*Figura 11: schema Polyjet*

Dopo che uno strato viene solidificato, il vassoio si abbassa e la testina riprende depositando un altro strato. La risoluzione dello strato arriva a 16 micron, facendo di questa tecnologia una delle più precise per creare strutture complesse. Questa tecnologia permette di poter creare più modelli contemporaneamente, garantendo la produzione in piccoli lotti, e di depositare le strutture di supporto assieme al prodotto, senza doverle inserire a parte. La presenza di ugelli multi-testina permette di avere materiali diversi per realizzare il prodotto. Il prodotto finale ha una finitura liscia e non necessita di post-trattamento. Gli svantaggi di questa tecnologia sono legati alla fragilità dei materiali utilizzati, ai costi di produzione elevati e ai pochi materiali disponibili per la produzione. I campi di applicazioni di Polyjet sono simili a quella della stereolitografia, con la differenza che si possono creare più facilmente piccoli lotti di produzione (Chaundary et al, 2022).

## **Multi-jet Modelling**

Ulteriore metodo di fabbricazione additiva è la tecnologia Multi-jet Modelling, dove il prodotto finito viene realizzato in strati, impiegando una testina di stampa con ugelli lineari. In questa applicazione, il materiale termoplastico a cera viene spruzzato

attraverso gocce sottili impiegando una testina di stampa riscaldata; successivamente le gocce vengono polimerizzate per solidificarla con luce UV.



**Figure 1: Multi-jet modelling [8]**

*Figura 12: schema Multi-jet Modelling*

Nel caso in cui ci siano parti sporgenti, le strutture di supporto vengono realizzate dalle testine di stampa con la cera; la cera ha una temperatura di fusione più bassa e quindi è sufficiente riscaldare il modello per rimuovere la struttura. Una volta ottenuto il modello, questa tecnologia necessita di alcuni trattamenti post-lavorazione, che possono essere eseguiti con grande facilità come incollaggio o rivestimento a macchina sotto-vuoto. I prodotti solitamente realizzati con questa tecnologia sono modelli concettuali e prototipi di design altamente dettagliati. I vantaggi di questa tecnologia sono la velocità di realizzazione di questi modelli e l'alto livello di dettaglio che viene garantito al prodotto finito (Tagliaferri et al, 2019).

## **Drop on Demand**

Il sistema drop on demand è un'altra tipologia di fabbricazione additiva con materia prima liquida; in questo processo il materiale (foto-polimeri o goccioline di cera) viene

depositato sotto forma di goccioline. Mentre viene depositato, il materiale viene polimerizzato attraverso la luce, e così continua costruendo il prodotto finito strato su strato.

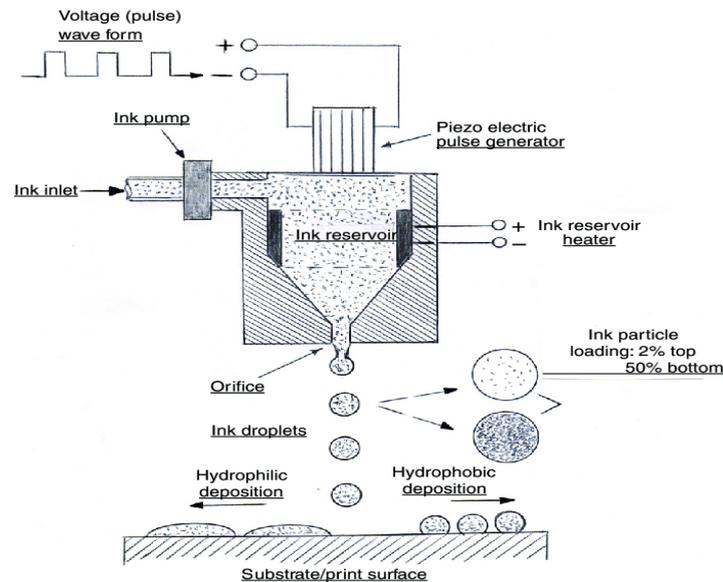


Figura 13: schema Drop on Demand

Come nella tecnologia Polyjet, è possibile utilizzare getti di stampa con materiali diversi, in modo da poter realizzare prodotti finiti con materiali diversi all'interno dello stesso oggetto. Come nel sistema MJM, le strutture di supporto vengono realizzate con un materiale diverso per avere una maggiore facilità di rimozione post-realizzazione del prodotto finito. A livello di prodotto finito, questo processo ha come vantaggio un'ottima rifinitura superficiale e una grande gamma di colori e materiali impiegati. Il Drop on Demand ha, come nel caso della tecnologia Polyjet, lo svantaggio di fabbricare prodotti molto fragili che non sono adatti per lavorazioni meccaniche e anche costi molto elevati per l'impiego di più materiali (Simonelli et al,2019).

## Laminate Object Manufacturing

La tecnologia Sheet Lamination o Laminated Object Manufacturing è una tecnologia di fabbricazione additiva; la tecnologia sovrappone diversi strati di fogli (lamine) del materiale desiderato, costruendo layer-by-layer un oggetto tridimensionale. I vari strati vengono tagliati attraverso un taglio laser per ottenere quella che sarà la sezione trasversale dell'oggetto desiderato. Dopo la sua modellazione, la piattaforma di costruzione della macchina scende per alimentare la produzione con un nuovo strato di materiale; il materiale viene depositato dalla piattaforma con colla attivata termicamente, per favorire l'unione del materiale aiutata anche dal passaggio del rullo di laminazione riscaldato per ogni strato modellato. I materiali utilizzati in questi processi sono fogli cartacei o polimerici, nastri contenenti metallo o ceramica; negli ultimi anni si è sviluppato l'impiego di lastre in fibra di carbonio per creare prodotti finiti molto resistenti.

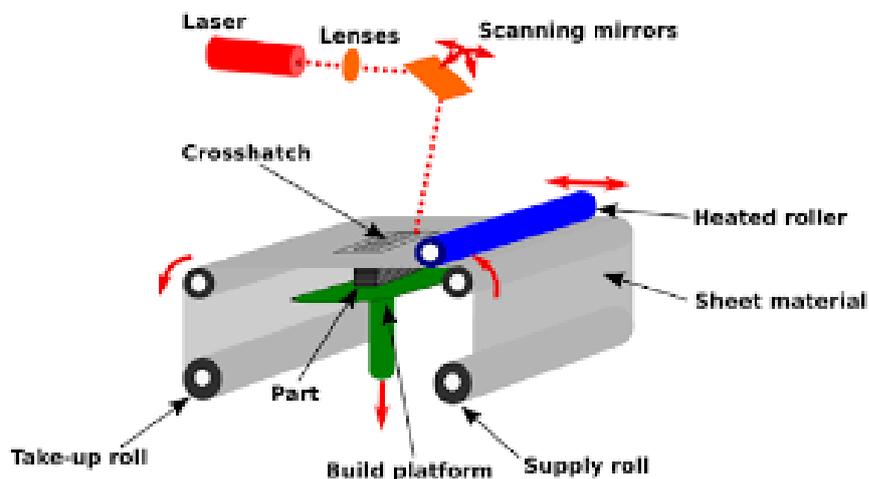


Figura 14: schema Laminated Object Manufacturing

I vantaggi di questi processi sono ritiro del pezzo minimo durante la lavorazione, ridotte tensioni residue e ridotti problemi di distorsione, nessuna fase di post-

lavorazione e la possibilità di creare pezzi di grandi dimensioni; inoltre, il costo di produzione è notevolmente minore rispetto ad altre tecniche di fabbricazione additiva. Gli svantaggi sono la mancanza di finitura superficiale e il fatto che ci siano numerosi scarti di lavorazione, aspetto ancora assente in gran parte delle tecnologie di fabbricazione additiva (Dermeik et al, 2019).

## **Fused Deposition Modelling**

L'altro processo di fabbricazione additiva con materiale allo stato solido è la Fused Deposition Modelling (FDM), ovvero una tecnologia che si basa sull'estrusione di materiale. Il suo funzionamento prevede che un filamento termoplastico, provenendo da una bobina, passi attraverso un estrusore; questo, grazie ad un ugello sottile, riscalda, fonde ed estrude la plastica. L'estrusore e l'ugello vanno a formare la testina di stampa: durante la lavorazione, essa si sposta lungo la piattaforma per andare a disegnare i vari strati del prodotto. La plastica depositata dalla testina di stampa, si fonda sullo strato già depositato e il suo indurimento è aiutata da ventole di raffreddamento, posizionate all'interno della camera di stampa. Lo spessore standard dei vari strati depositati da questa tecnologia è di 0,1mm.

I vantaggi di questa tecnologia sono una facilità di apprendimento, una standardizzazione del processo che facilitano il suo utilizzo non solo in ambito industriale, ma anche nell'ambiente degli uffici venendo impiegati per la prototipazione rapida e per la produzione a basso volume. Gli svantaggi sono gli strati molto grandi rispetto alle altre tecnologie, che richiedono numerose fasi di post-lavorazione come sabbiatura, burattatura, levigatura a vapore. Un altro problema riguarda la necessità di rimuovere i supporti post-lavorazione; si sono però sviluppate negli ultimi anni delle stampanti FDM che depositano supporti in materiale solubile, in modo da rimuoverlo nel lavaggio post-lavorazione. In generale il limite rispetto ad una SLS o ad una MJF è minor accuratezza e una minor durata del prodotto.

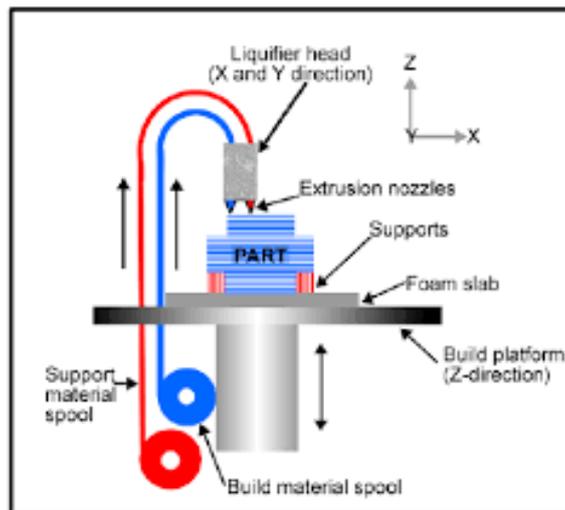


Figura 15: schema Fused Deposition Modelling

I materiali impiegati più comuni sono l'acido polilattico (PLA) che è molto economico, ma poco duraturo e resistente, l'acrilonitrile butadiene stirene (ABS) che è più duraturo, ma più costoso e il filamento di nylon, usato per creare parti più durature; negli ultimi anni la FDM ha iniziato impiegare anche fibre di carbonio e paste di metallo per realizzare circuiti integrati, batterie e conduttori.

Il settore di maggior successo della FDM è quello della prototipazione industriale, anche se viene sfruttata in alcuni casi per produzione su larga scala come nella produzione di maschere e fissaggi nel settore automobilistico e aerospaziale (Gordolier et al, 2019).

## Direct Energy Deposition

Tra le tecnologie di fabbricazione additiva, la Direct Energy Deposition (DED) si può definire un processo di fabbricazione additiva ibrida rispetto alla natura del materiale usato. Questo processo realizza componenti fondendo i materiali e andandoli a depositare sul pezzo, strato per strato. Questa tecnologia di fabbricazione additiva impiega nella maggior parte dei casi metalli per la realizzazione del prodotto finito,

sottoforma di polveri metalliche. La differenza con le tecnologie tradizionali a letto di polvere è che in questo caso, non si deposita la polvere su una piattaforma, ma viene estrusa tramite un ugello e nel momento stesso in cui si estrude, il materiale viene fuso da una sorgente di energia ad alta intensità come laser o elettroni; questo come nella tecnologia a letto di polvere porta alla successiva solidificazione del materiale, andando a creare il prodotto finito strato per strato.

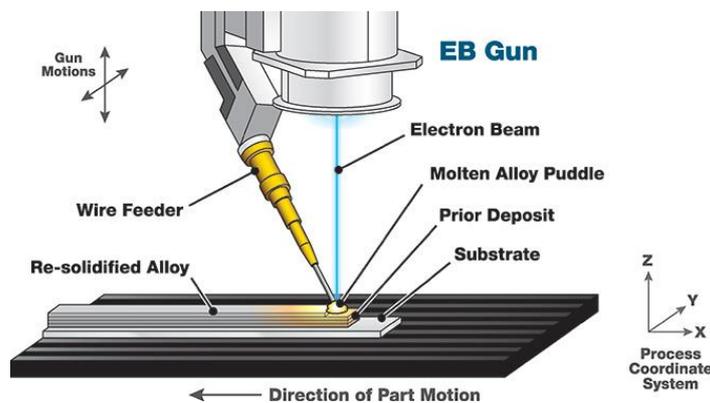


Figura 16: schema Direct Energy Deposition

È indispensabile che nel caso di una sorgente a elettroni, si abbia la camera sottovuoto e che nel caso di metalli particolarmente reattivi si vada a creare una camera inerte, con processi che richiedono una grande quantità di tempo per arrivare a raggiungere il livello di ossigeno desiderato. Questa tecnologia viene utilizzata per creare pezzi da zero, ma la sua maggior applicazione è nel campo della riparazione di prodotti danneggiati come lame di turbine o eliche danneggiate. Questa tecnologia è nata utilizzando i metalli, ma in alcune applicazioni vengono impiegati polimeri e ceramiche. Uno dei vantaggi di questa tecnologia rispetto ad altre tecnologie 3D, è la possibilità di creare pezzi relativamente grandi (Svetlizky et al, 2019).

# Capitolo III

## Applicazioni e analisi del settore AM

In questo capitolo si analizza la situazione del settore AM, i suoi principali campi di applicazione e le sue tendenze future a livello mondiale, europeo ed italiano.

### Analisi economica settore AM

Secondo il “*Market Research Report*”, il mercato mondiale dell’Additive Manufacturing vale nel 2022 circa 18,33 miliardi di dollari, con il mercato nord - americano che da solo vale circa un terzo dell’intero mercato globale; altre stime settoriali ( “*Research & Markets*”, “*Grand View Research*”) hanno stimato un valore leggermente più (circa 16,83 miliardi), ma sono concordi nell’affermare che il mercato dominante per l’AM sia quello nord-americano con un terzo della fetta mondiale.

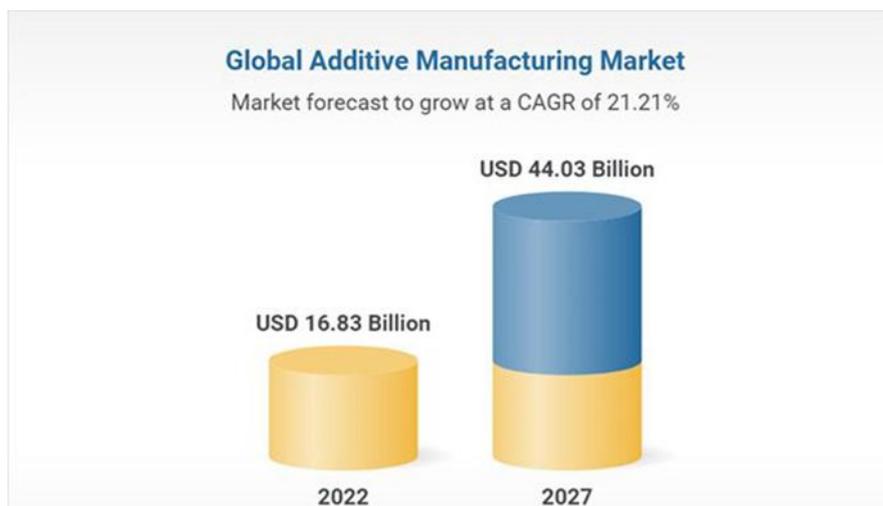


Figura 17: Crescita del mercato della produzione additiva (crediti fotografici: Research and Markets)

Il Compound Annual Growth Rate (CAGR) ottenuto da questi risultati per il settore è del 20,8% per “Grand View Research” e di 21,21% per “Research&Markets”, che porterebbe il valore del mercato globale a 44,7 miliardi di dollari per “Research&Markets” nel 2027, e a 76,16 miliardi nel 2030 per “Grand View Research”. Per “Grand View Research” il 60 % degli introiti del settore nel 2022 deriva dal segmento hardware, mentre il restante 25% e 5% appartengono al segmento software e servizi. Secondo le stime, la percentuale di questi due segmenti è destinata a salire nel prossimo decennio, poiché si ritiene che la diversificazione nella proposta (vendita delle tecnologie e software CAD, assistenza integrata post-vendita) diventerà un fattore di differenziazione fondamentale tra le aziende AM. “Precedence Research” ritiene che una crescita importante ci sarà nell’utilizzo delle stampanti AM desktop, che nel 2022 rappresentano il 35% delle stampanti AM impiegate; si ritiene infatti che la crescita del settore porterà un aumento della ricerca presso gli istituti scolastici ed università, dove possono essere impiegate più facilmente stampanti di piccole dimensioni. Questo crescente interesse è confermato da numerosi report, tra cui uno realizzato da MHI e Deloitte, dove è stato intervistato a fine 2020 un campione di 1000 aziende che si occupano di supply chain nel Nord-America, in cui viene evidenziato come il 21% delle aziende utilizzi già la tecnologia AM all’interno della sua catena logistica, mentre il 35% di esse abbia intenzione di investire in questa tecnologia nei prossimi 5 anni. Di seguito viene riportato un grafico relativo al sondaggio su quanto le aziende investono in un determinato lasso di tempo (dati presi da *MHI International Report 2021*):

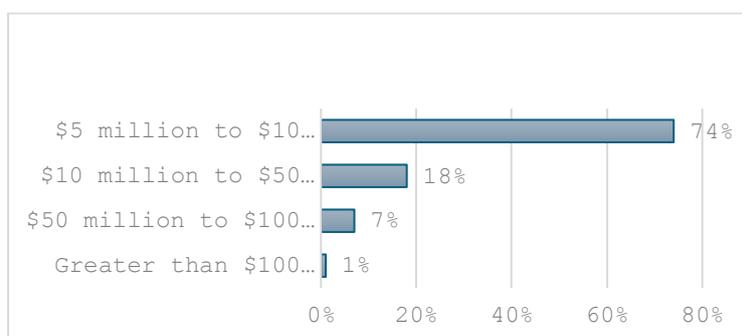


Figura 18: sondaggio MHI International Report 2021

Secondo “*Research & Markets*” e “*Grand View Research*” l’Europa e la regione dell’Asia-Pacifico hanno entrambe circa il 25% di porzione di mercato mondiale. Il dominio dell’area americana rispetto a queste due macroaree è determinato dalla presenza sul suolo americano di tutte le più grandi aziende del settore e di tecnologie all’avanguardia per la produzione di prodotti finiti. La regione Asia-Pacifico è quella che secondo le stime avrà nel prossimo futuro una crescita più elevata con CAGR previsto del 24,8% partendo da una base di partenza di 3,8 miliardi di dollari. Le previsioni di questa crescita più alta sono date dal fatto che nel febbraio 2022 il ministero dell’economia e dell’IT indiano ha varato il “National Strategy for Additive Manufacturing”, che punta a far diventare il solo mercato indiano il 10% del mercato globale. Questa crescita è trainata anche dalla Cina, il cui mercato secondo le stime varrà 15,7 miliardi di dollari nel 2032, grazie ad investimenti e alla presenza di numerose applicazioni nel settore automotive.

La crescente fiducia in questo settore non vi è solo nel vasto mercato nord-americano e asiatico, ma anche in quello europeo con prospettive di crescita e fiducia tra gli stati come testimonia il sondaggio *CECIMO* del 2022; circa il 45% dei partecipanti al sondaggio pensa che il settore AM sarà in crescita nei prossimi anni, con solo il 5 % con opinione contraria. Da questo sondaggio emerge come il 35% della popolazione presa a campione sia convinta della crescita degli investimenti nel settore e il 45% pensa che ci sarà una crescita nella produzione di prodotti finiti in AM. Un dato interessante che emerge dal sondaggio è quello relativo al business trend del settore AM; circa il 37 % dei rispondenti nel 2022 crede nella crescita del settore AM aerospace contro il 7% del 2021. Una crescita significativa di fiducia in questo ramo, che va di pari passo con la stabilità della fiducia nella crescita dell’AM automotive intorno al 28% e invece si contrappone a una diminuzione della fiducia nel settore AM medical passata dal 74% di fine 2021 al 47% di fine 2022.

Nel mercato europeo il paese guida è la Germania anche grazie ad investimenti fatti nei decenni precedenti, seguita dal Regno Unito. Molti di questi investimenti vengono portati avanti direttamente dall’Unione Europea: è il caso dell’industria italiana Roboze

che ha ricevuto un finanziamento dall'Unione Europea nel 2019 di 30 milioni di euro, per lo sviluppo delle proprie tecnologie.

A livello mondiale, l'industria automotive è il campo di applicazione maggiormente diffuso per le tecnologie AM (vale circa 4,6 miliardi di dollari) seguito da quello medicale (3,7 miliardi di dollari) e da quello aerospace, che si presenta come quello con le prospettive di crescita migliori. Le sfide per questi settori negli anni futuri sono differenti: da una parte il settore automotive cercherà di produrre componenti finali con un peso minore, il settore aerospace si concentrerà sullo sviluppo e progettazione di parti sempre più complesse da inserire sugli aeromobili. La possibilità di produrre parti con geometrie complesse è uno dei fattori che secondo le stime porterà alla crescita del settore medico, dove la domanda di protesi e impianti personalizzati è sempre crescente.

È interessante notare come a seconda della macroregione cambino i settori di utilizzo finale dei prodotti realizzati in AM; nel mercato americano dominano l'automotive e il settore medicale con un buono sviluppo del settore aerospace, mentre in Europa e nell'Asia-Pacifico sono l'automotive e l'aerospace ad occupare la fetta più importante del mercato (*dati Additive manufacturing market*).

Come applicazione, quella dominante rimane quella legata alla prototipazione da cui derivano il 55% dei ricavi del settore: essa viene largamente ancora usata nei campi citati in precedenza per la progettazione e lo sviluppo dei prodotti finali. Saranno proprio i prodotti finali per "*Grandviewresearch*" ad avere la crescita maggiore nel prossimo decennio con un CAGR previsto del 21,7%. A livello di tecnologie, per i dati 2021 la tecnologia più utilizzata è la stereolitografia che detiene circa l'8% della revenue totali del settore. Questa tecnologia è di facile applicazione in molti ambiti, ma si ritiene anche sia quella con minori margini di crescita. La seconda tecnologia più diffusa è la PBF, ma le stime di crescita più elevate prospettate sono riferite a tutti i tipi di tecnologia AM altamente specializzati come la DLP, l'EBM e la DLMS.

A livello di materiali, secondo *“Additive Manufacturing Market”*, i più utilizzati continuano ad essere i materiali polimerici poiché sono facile da usare ed economici soprattutto nel campo della prototipazione. I materiali metallici sono la seconda categoria più utilizzata, in particolare nell’automotive e nell’aerospazio dove vengono impiegati per realizzare parti in alluminio, titanio e acciaio inossidabile. La categoria, le cui stime di crescita relativo all’impiego sono più alte, è quella dei materiali ceramici grazie alla loro resistenza agli agenti esterni e alla possibilità di creare parti complesse e durature per il settore medicale ed elettronico. Un aspetto sempre più importante per il futuro dell’AM è l’analisi e la corretta scelta dei materiali per il prodotto finito. Le aziende produttrici dedicano sempre più spazio alla ricerca e allo studio di nuove leghe metalliche e polimeriche, poiché le nuove applicazioni richiedono un’analisi molto accurata dal materiale: un esempio di questo è lo studio della porosità dei materiali per costruzione di impalcature e tessuti nel settore medicale.

Il crescente interesse nel settore ha portato per gli stati più competitivi la necessità di creare certificazioni e standard per la messa in commercio di prodotti realizzati con AM. Nel 2017 la Federal Aviation and Administration (FAA) ha creato una certificazione ad hoc per la realizzazione delle parti di aeromobili realizzati con AM, così come nello stesso anno la Food&Drug Administration (FDA) ha elaborato una serie di linea guida per la realizzazione e conservazione dei prodotti AM, per il settore medicale.

Il grafico sotto riportato evidenzia le aziende che a livello mondiale hanno avuto più applicazioni e brevetti relativi alla tecnologia AM. Si può notare come questo grafico rispecchi la divisione a livello globale relativo allo sviluppo di questa tecnologia: infatti le aziende più avanti nelle applicazioni sono tutte aziende americane, seguite da quelle europee con l’eccezione della Fujifilm che fino al 2013 era leader come applicazioni, ma poi è stata superata dai colossi americani come GE e HP. Non compaiono nella top-20, ma va segnalato che produttori di stampanti 3d e start-up come EOS e Stratasys abbiano circa 200 IPFs, segno che non solo le grandi aziende investano nella ricerca sui prodotti finiti, ma anche le aziende produttrici di stampanti stesse.

Top 20 applicants in AM technologies, 2001–2020

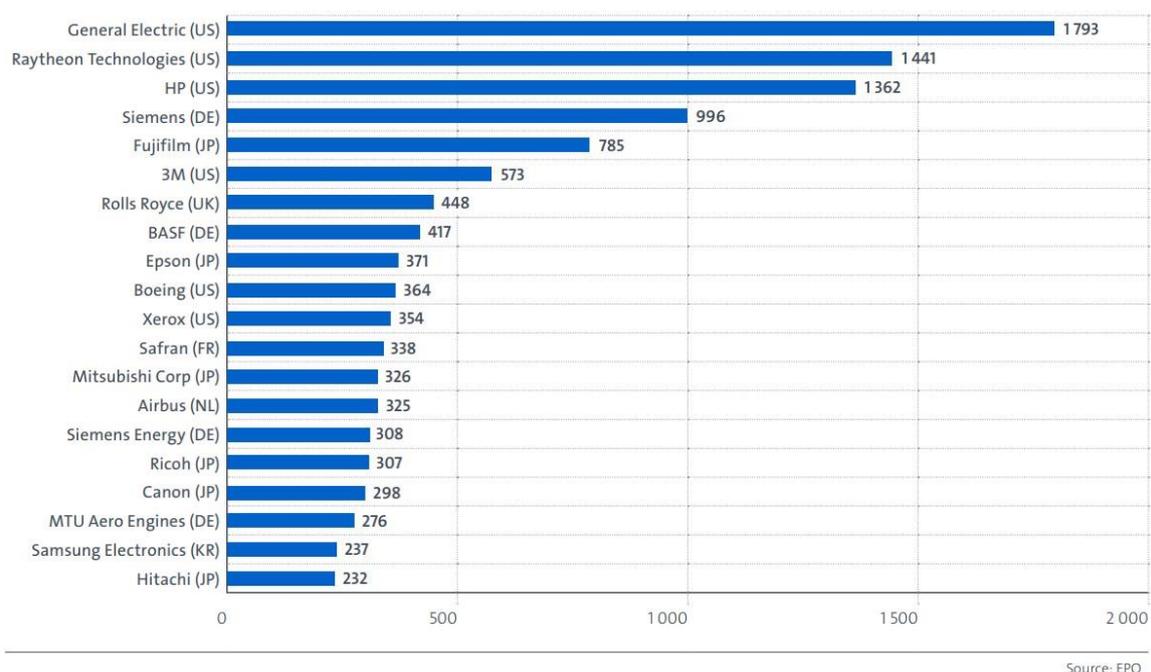


Figura 19: grafico su dati IPFs

## Il settore AM italiano

L'Italia è la seconda nazione in Europa a livello di macchine AM industriali installate (4,7% delle macchine installate a livello globale, per "Wohlers Associates" 2023), seconda solamente alla Germania e sesta per brevetti AM depositati, con 574 brevetti depositati (analisi EPO 2013-2020); secondo quest'analisi il numero dei brevetti depositati in questo periodo per le tecnologie AM è stato mediamente otto volte superiore a quello dei brevetti depositati per altre tecnologie. Secondo il rapporto AITA 2022 (Associazione italiana tecnologie additive), il mercato italiano ha iniziato a crescere in maniera significativa solamente nell'ultimo decennio con un aumento dell'88% degli impianti AM sul suolo italiano. La decisione di entrare in questo mercato e la sua diffusione veloce, viene favorita secondo le imprese intervistate dal fatto che si ritenga che un investimento in AM porti un Return On Investment (ROI) positivo nel breve-medio periodo. Da questo rapporto emerge come il 37,5% delle

aziende italiane abbia deciso di entrare nel mercato AM, poiché lo considera un mercato in espansione, mentre il 35% vede questo mercato come un settore di nicchia, ma potenzialmente interessante, a testimonianza del crescente interesse in questa tecnologia. Secondo il rapporto SPS Italia del 2021, il 60% delle aziende italiane considera i metalli, i materiali AM più interessanti per il futuro, così come rispettivamente il 40% e il 32% ritiene che il “Materiale Jetting” e il PBF saranno le tecnologie più interessanti per il futuro. Le aziende intervistate in questo rapporto vedono come vantaggio più importante legato all’introduzione dell’AM, la riduzione dei tempi di progettazione e produzione (73,17%), seguito dalla riduzione dei costi(26,83%). In questo rapporto emergono anche i limiti dell’industria italiana legato all’AM, dove il 36% delle aziende afferma di non avere ancora avuto l’opportunità di testarla, ma soprattutto di non avere una sufficiente conoscenza tecnologica alla base per sfruttare questo tipo di tecnologia. Le skills che mancano maggiormente sono le competenze approfondite sui processi (72%), competenze sul design della produzione additiva (60%) e conoscenza sulla metodologia di post-processo (52%).

Se si considera il ruolo maggiormente svolto dalle aziende, il 23% delle aziende AM lavora come fornitore di servizi, il 17% lavora nella progettazione e il 13% rispettivamente per società di test-software e sviluppo-software. I settori principali di applicazione dell’industria AM in Italia sono i seguenti e così ripartiti per fatturato, come in figura:

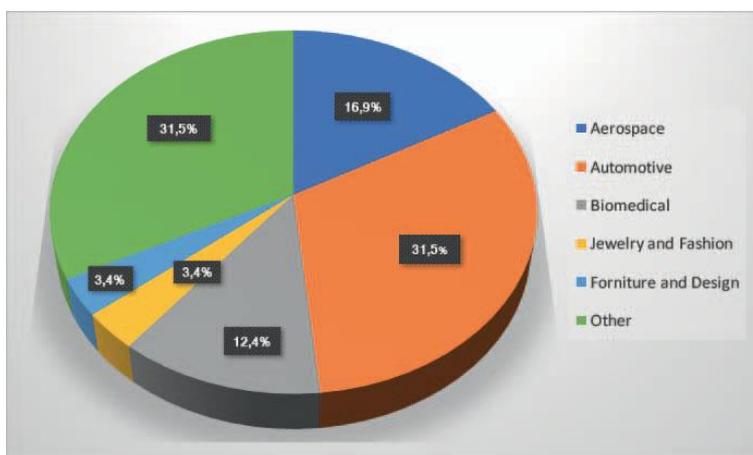


Figura 20: Dati rapporto AITA 2022

Dai rapporti e da questa analisi, emerge quindi la fiducia delle aziende italiane nella crescita del settore AM in Italia che conferma la tendenza vista precedentemente a livello mondiale ed europeo.

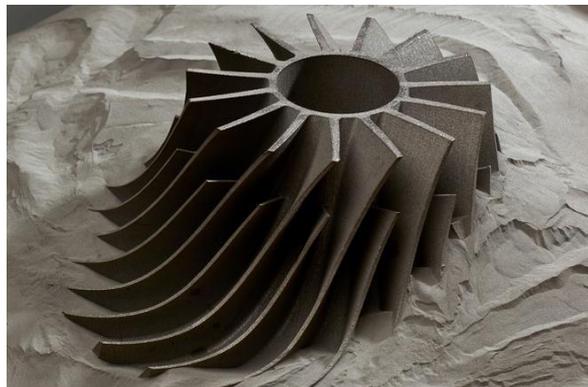
## **Applicazioni per tecniche di produzione**

Dopo l'analisi del settore, si analizzano le principali e più innovative applicazioni per le tecniche di produzione citate nel capitolo precedente:

- **Stereolitografia (SL):** come altre tecnologie AM, la stereolitografia viene utilizzata maggiormente nella creazione di prototipi; un altro campo dove viene impiegata questa tecnica riguarda la creazione di stampi ad iniezioni con forme personalizzate e stampi per fonderia, per gioiellerie e dentisti. Una delle applicazioni più innovative di questa tecnologia riguarda la creazione di valvole cardiache, attraverso l'utilizzo di una specifica sostanza polimerica (Schaefermeier et. 2008). L'innovazione più grande è attuata nel materiale impiegato che permette al tessuto della valvola cardiaca di stare all'interno del corpo umano, come delle vere cellule, evitando così il problema del rigetto della valvola da parte del paziente. Un'altra applicazione medica della SL riguarda la costruzione di denti, dove la difficoltà incontrata per molti anni dall'industria medica è stata quella di riprodurre la traslucidità dei denti naturali; oggi questo è possibile grazie all'impiego con la SL di una lega di litio disilicato e materiale ceramico che permettono al dente installato di avere questa proprietà (Baumgartner et.2020).
- **Fused deposition modeling (FDM):** anche questa tecnologia ha come la SL una sua importante applicazione in ambito medico, in quanto viene utilizzata per la realizzazione delle "transmission drugs", ovvero compresse che agiscono disperdendo nanoparticelle di prodotti farmaceutici lungo tutto il corpo; in questo caso il materiale impiegato è l'alcol polivinilico (Long et. 2017). Un

ulteriore impiego è nella realizzazione di getti, sostituendo le tradizionali cere, ma garantendo comunque buona qualità superficiale e accuratezza dimensionale; il materiale usato in questo caso per sostituire le classiche cere è il polimero termoplastico ABS. Recentemente, questa tipologia di produzione ha iniziato a diffondersi presso le scuole e le università, permettendo così agli studenti di creare e sperimentare in loco le potenzialità di questa tecnologia (Kumar et. 2012).

- **Powder bed fusion (PBF):** questa tecnologia viene impiegata nel settore aerospace e automotive per la realizzazione di componenti duraturi, anche se di dimensioni limitate; la durabilità di questi prodotti è garantita dall'impiego di polimeri come nylon, poliuretano espanso e materiali compositi. Nel settore automotive in particolare viene impiegata per la creazione di stampi di pneumatici e per le cinture di sicurezza, dove l'aggancio viene creato in un pezzo unico, mentre nel settore aerospace viene utilizzata specificatamente per creare i canali di raffreddamento all'interno dei motori (Liu et.2021).



*Figura 21: Canale di raffreddamento prodotto attraverso PBF*

Per i prodotti metallici, questa tecnologia viene impiegata per la realizzazione di parti robotiche grazie all'impiego di una lega di alluminio, garantendo un peso minore rispetto ai componenti prodotti con metodi tradizionali. In molti di questi casi la tecnologia AM permette di integrare già in fase di progettazione

l'installazione di sensori che servono a monitorare in tempo reale il corretto funzionamento del mezzo robotico (Kaspar et.2019).

**Direct energy deposition (DED):** questa tecnologia ha ampia applicazione nel settore aerospace e militare, poiché permette di realizzare componenti di materiale diverso tra loro e allo stesso tempo di dimensioni più elevate rispetto alla PBF. Un caso interessante di applicazione non citata precedentemente della PBF è la realizzazione di componenti in acciaio inossidabile 316L. Questi componenti tendono ad avere degrado e spesso si ricorre a tecniche tradizionali per ripararli; queste tecniche però creano spesso regioni influenzabili dal calore che portano alla necessità di un ulteriore intervento di riparazione (Balit et.2021). La tecnologia DED permette invece di riparare questi componenti in tempi più rapidi, garantendo al componente un ciclo di vita di durata uguale al precedente, contro una durata uguale a un quinto della precedente per i metodi di riparazione tradizionali: questo è possibile grazie ad una regione termicamente influenzata limitata e un legame metallico più robusto (Bennett et. 2019).

- **Selective laser sintering (SLS):** l'applicazione più diffusa di questa tecnologia è l'impiego nella prototipazione, divenuto un aspetto fondamentale nel mondo aziendale per diminuire i tempi di lancio sul mercato del prodotto. A seconda dei materiali impiegati, varia la tipologia di prototipi costruiti: per costruire inserti per utensili viene impiegata una poliammide di rame, mentre per la realizzazione di prototipi speciali come cerniere e scheggiature vengono utilizzate sostanze a base di nylon (Dimov et.2001). Come nel caso della stereolitografia, questa tecnologia viene utilizzata per la costruzione di tessuti nel settore biomedicale. La tecnologia AM garantisce la possibilità di creare micro e macro-architetture con tolleranze dimensionali migliori rispetto alle impalcature costruite manualmente. Un aspetto importante per la costruzione di questi componenti è la scelta di materiali biocompatibili; vengono utilizzati per questo motivo, una bioceramica come l'idrossiapatite e polimeri biocompatibili

che includono poliestere etere chetone, policaprolattone, alcol polivinilico e polilattide. Questi materiali vengono analizzati dapprima al microscopio elettronico a scansione per verificare le corrette caratteristiche di porosità della materia (Williams et. 2005).

- **Binder Jetting:** questa tecnologia ha subito avuto una grande diffusione nel settore della prototipazione rapida, grazie alla sua potenzialità di produrre parti complesse in tempi brevi, senza particolari vincoli di design.



*Figura 22: Tessuti realizzati con Binder Jetting*

Un'altra grande potenzialità è la possibilità di produrre prodotti finiti con complicate e specifiche geometrie interne come struttura a lattice o struttura a nido d'ape; due esempi di questa applicazione sono nell'industria aerospace dove alcuni componenti vengono realizzati con struttura a lattice per ridurre il consumo e le emissioni, mentre i canali di raffreddamento vengono progettati con queste strutture complesse per favorire la dispersione del calore.

Questa tipologia di tecnologia permette di comporre parti diverse tra loro in un'unica struttura monolitica. È il caso dell'industria automotive dove varie parti ed elementi del motore vengono assemblati in un blocco unico con canali di raffreddamento, elementi strutturali e caratteristiche di montaggio integrata in un unico design (Trenfield et.2018).

# Capitolo IV

## L'impatto dell'AM sulla SC

In questo capitolo si inizia ad analizzare come la tecnologia dell'additive manufacturing impatta sulla struttura della supply chain, quali sono i driver che guidano questo impatto e quali sono i rispettivi vantaggi e svantaggi dell'adozione di questa tecnologia.

### Struttura classica SC nella manifattura

Dall'epoca delle grandi rivoluzioni industriali fino alla fine del secolo scorso, la struttura della manifattura mondiale è sempre stata la stessa: un insieme di operazioni centralizzate e su larga scala. Sfruttando le operazioni su larga scala e grazie all'economie di scala, la produzione di massa ha permesso nel corso di decenni di offrire prodotti a basso costo, un livello elevato di standardizzazione e un'alta divisione del lavoro che ha portato alle aziende manifatturiere guadagni elevati (Hu, 2013) . Questa situazione è iniziata a cambiare alla fine del secolo scorso con l'avvento della globalizzazione, con le classiche aziende centralizzate che hanno cominciato a trasformarsi per soddisfare il nuovo mercato globale. In questo contesto, hanno iniziato a svilupparsi i fenomeni dell'offshoring e dell'outsourcing aiutati dalla riduzione delle barriere commerciali, dallo sviluppo del trasporto via container e dalla crescita delle comunicazioni tecnologiche; molte aziende dalla fine degli anni '90 hanno adottato queste politiche in paesi in via di sviluppo, spinti in molti casi dal minor costo del lavoro e delle materie prime (Laplume et al., 2016, Ashby 2016). Secondo le stime di

McKinsey, questa tendenza ha riguardato maggiormente le aziende manifatturiere *labor-intensive*, (abbigliamento, tessile) e meno quelle *resource-intensive* (estrazione mineraria, energetica, agricola).

La tendenza di questo fenomeno ha portato la creazione di un sistema molto frammentato, con strutture di produzione sia nei paesi in via di sviluppo che in quelli già industrializzati, che travalicando i confini nazionali hanno faticato ad avere una coordinazione forte; si sono create dunque lunghe e complesse SC in tutto il mondo che sono formate da grande numero di aziende altamente specializzate, con però un basso livello di integrazione verticale (Buckley & Strange, 2015). Si analizza ora come sono costituite queste SC che verranno considerate all'interno di questa trattazione come esempio di struttura classica di SC. Si può considerare la SC per la produzione di un prodotto divisa in cinque differenti stazioni, con il flusso di creazione del materiale che va dalla prima stazione fino alla quinta (non si considera per il momento l'eventualità, di un flusso inverso per il riciclo dei materiali):

- **Fornitori di materie prime:** questa stazione è caratterizzata dalla presenza di molteplici fornitori di materie prime.
- **Produttori di componenti:** questa stazione è caratterizzata dalla presenza di molteplici fornitori di componenti e spesso questa produzione avviene tramite outsourcing
- **Centro di produzione e assemblaggio del prodotto:** questa stazione è caratterizzata dalla presenza di molti passaggi di lavorazione e si richiedono per questa fase numerosi investimenti in macchine, utensili e strumentazioni. Solitamente viene impiegato un solo centro di produzione per la produzione di massa.
- **Retailers:** questa stazione è caratterizzata dalla presenza di molteplici retailer, da cui arriva la merce in uscita dal centro di produzione. Spesso il trasporto tra queste due stazioni ha costi molto elevati così come lunghi lead time.

- **Industrial customers:** in questa stazione, sono rappresentati tutti i vari negozi, attività in cui arriva la merce consegnata dai retailer. Anche qua le caratteristiche e i problemi del trasporto sono simili rispetto al trasporto tra il centro di produzione e i retailers (Farooque et al., 2019).

La figura 23 qui riportata rappresenta come è strutturata una SC centralizzata, con tutte le sue fasi, e i vari flussi del prodotto ed informativi:

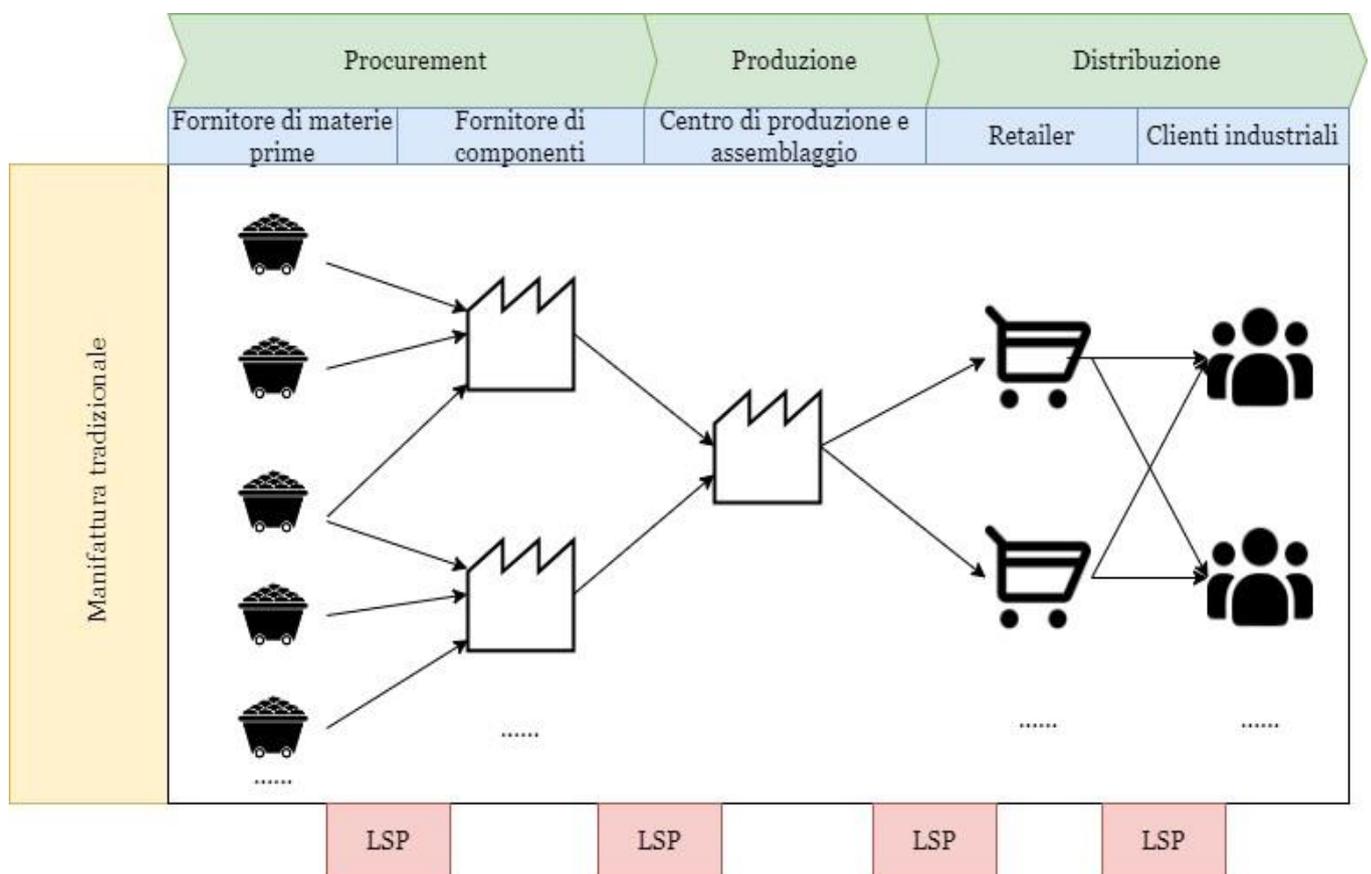


Figura 23: schema SC tradizionale centralizzata

Si può notare come per realizzare un prodotto con questa struttura bisogna riuscire a pianificare e far coincidere l'arrivo dei flussi provenienti dalla fase di procurement; un solo ritardo di un singolo componente può causare un grande ritardo sia per la fase di produzione, ma anche per tutte le fasi a seguire con un abbassamento del livello di servizio percepito dal cliente. Le varie stazioni sono messe in comunicazione tra loro

dai Logistic Service Providers (LSP), sia per lo scambio di informazioni, che per lo scambio e trasporto di merci: inoltre questi sono servizi spesso vengo usati dalle aziende per gestire i magazzini e il loro approvvigionamento nella catena logistica. La presenza e l'efficienza di questi attori è fondamentale per il corretto funzionamento della SC. La costruzione e la crescente diffusione di queste SC nel corso degli ultimi anni, ha portato globalmente ad incontrare numerose difficoltà: alta complessità, lunghezza, e lentezza nella risposta sono alcune delle cause che portano ad avere disruption nella SC. La grande frammentazione, con lunghi lead time che si sommano, porta a separare e a non avere più una visione chiara della domanda rispetto al reale bisogno. Le situazioni che si vedono all'interno della SC sono quelle legate alla sovrapproduzione, alla necessità di scorte di sicurezza e alla riduzione del livello di servizio (Sasson & Johnson, 2016).

A supporto di questo, vi è un rapporto di Deloitte del 2022, eseguito su un campione di aziende americane, dove circa l'80% delle aziende intervistate afferma di aver vissuto negli ultimi 12-18 mesi una significativa disruption all'interno della loro supply chain; circa il 90% afferma che nell'ultimo decennio sono aumentate esponenzialmente le interruzioni della SC, con questo aumento che è stato amplificato dalla crisi pandemica. Nel 50% dei casi queste disruption hanno avuto un impatto sia sulla produttività che sulla profittabilità delle SC intervistate. Per il 59% degli intervistati, la problematica che ha il maggior impatto sulla SC, sono i ritardi nel trasporto nel via mare, seguito dalla mancanza di componenti e dai ritardi nel trasporto via terra per il 56%. La preoccupazione più grande a livello di costi da affrontare per riuscire a sostenere i contratti in atto, è la crescita dei costi del trasporto via mare per il 46%, seguita dai costi derivanti dalla mancanza di prodotti presso i fornitori e dai costi crescenti per studiare un nuovo modello di SC per il 43%; la preoccupazione per il costo dello shipping è dovuta ad aumento del 77% avuto tra Gennaio 2021 e Agosto 2022 a causa di un aumento del costo del carburante e del lavoro.

Queste scelte di offshoring e outsourcing hanno generato un ulteriore problema all'interno delle SC: l'aumento dell'inquinamento legato ai lunghi trasporti globali da

effettuare. Questo è diventato un serio problema per le SC all'inizio del decennio scorso, poiché vi è stata una crescita della sensibilità mondiale legato ai temi dell'inquinamento e della sostenibilità ambientale con un'opinione pubblica che ritiene in molti casi non più tollerabile preferire la scelta del minor costo di manodopera e materie prime in paesi in via di sviluppo, rispetto ad un aumento dell'impatto ambientale del trasporto, anche nel caso in cui il costo di questo sia inferiore rispetto a quello della manodopera rendendo così la scelta economicamente profittevole. Inoltre, il terzo punto della sostenibilità aziendale legato al sociale è stato spesso messo in discussione dall'opinione pubblica, poiché in molti paesi in via di sviluppo le condizioni e gli stipendi dei lavoratori e il rispetto dei diritti umani non vengono più ritenuti accettabili dalla società. Per questi motivi, considerando anche la necessità di rendere più resiliente le SC complesse, da verso la metà dello scorso decennio le aziende hanno iniziato le operazioni di reshoring e nearsourcing (ritorno delle operazioni o nel paese di origine dell'azienda o nei paesi limitrofi con un costo più basso, come avviene in paesi come Polonia, Romania e Ucraina per le aziende tedesche o italiane) delle loro attività per aumentare la resistenza della loro SC (Tate et al. 2014); in questo contesto e nella necessità di rinforzare la SC, si inserisce l'AM con le sue opportunità di modificare la SC che si tratteranno nei prossimi paragrafi.

## **Come l'AM cambia la SC**

Si analizza ora come l'AM può riuscire a cambiare il design della SC e come si potrebbe interfacciare con i problemi delle SC tradizionali. Iniziamo questa analisi andando ad analizzare gli aspetti economici dell'AM, osservandone vantaggi e svantaggi per comprendere come questi aspetti possano poi influenzare le scelte di design della SC. A livello di costi, bisogna considerare come l'AM non goda ancora delle economie di scala, tipiche delle manifatture tradizionali, a causa della lentezza dei processi e della capacità limitata di essi; in uno scenario di produzione di massa

centralizzata, le tecnologie tradizionali si dimostrano dal punto di vista economico, più favorevoli (Busachi et al., 2017). Come si evince dalla figura 24, il costo per unità dei prodotti realizzati in AM, scende subito all'inizio, ma poi rimane costante all'aumentare del numero di pezzi prodotti, a differenza di quanto avviene per le tecnologie tradizionali.

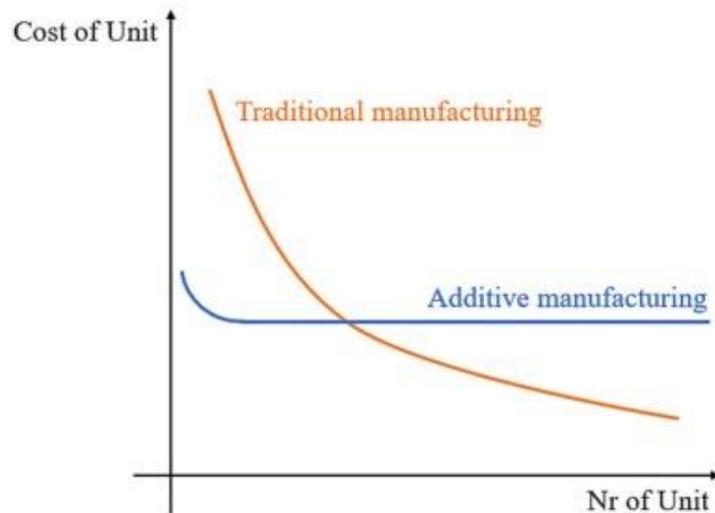


Figura 24: La funzione di costo con le unità prodotte (Busachi et al., 2017, Hopkinson and Dickens, 2003).

Un altro problema a livello economico è che non si riesce a standardizzare con l'AM la qualità dei prodotti a livello di forza, durezza, sicurezza, consistenza, accuratezza e replicabilità della produzione dei prodotti e dei ricambi realizzati con tecnologia additiva: questo genera costi elevati in fase di post-produzione per rifinire i prodotti (ad esempio la lucidatura delle superfici per l'aspetto). Un'ulteriore difficoltà derivante dalla poca standardizzazione dei prodotti si presenta nella stipula delle garanzie dei prodotti e nell'assicurazione di qualità degli stessi (Kortelainen et. 2018). L'AM porta però anche dei vantaggi a livello economico, specialmente nel caso in cui sia presente una tendenza da parte dell'aziende di avere una catena logistica decentralizzata, con una produzione specializzata ad alto valore per il cliente. Nascendo per quella applicazione, l'AM riduce i lead time legati alla prototipazione e anche l'investimento per il design del prodotto e le sue relative strutture; l'intero time-to-market del prodotto viene ridotto. L'altro grande vantaggio dell'AM a livello economico è la possibilità di operare design complessi e personalizzati, senza un aumento dei costi; basta modificare

il disegno CAD per realizzare il nuovo prodotto, a differenza dei metodi di produzione tradizionali dove bisognerebbe modificare lo stampo o dove, in caso di design molto complessi, il tempo per la realizzazione dello stampo diventa elevato (Busachi et al., 2017). Il grafico riportato in figura 25 mostra come la funzione di costo per unità per la manifattura tradizionale salga all'aumento della complessità del design e rimanga costante invece per l'AM.

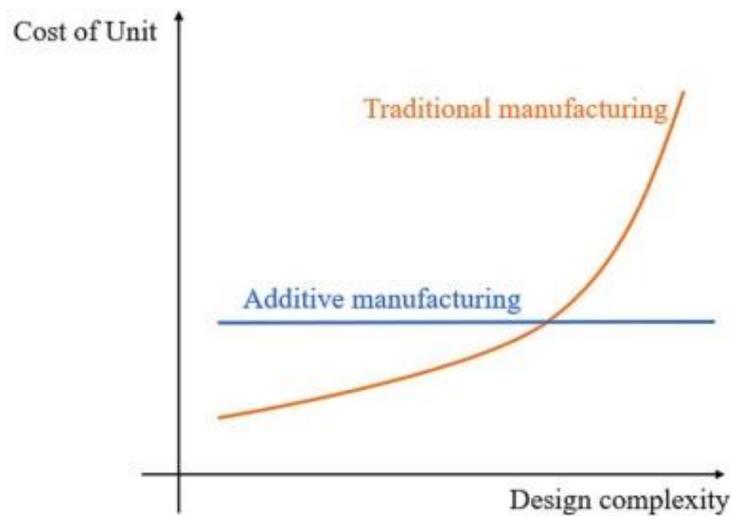


Figura 25: Andamento della funzione di costo in base alla complessità geometrica (Busachi et al., 2017, Hopkinson and Dickens, 2003)

La possibilità data al cliente di customizzare il prodotto e di poterne decidere la complessità, aumenta il valore percepito dal cliente e di conseguenza anche la *willingness-to-pay* dello stesso. Per questo motivo, in molti casi le aziende, che realizzano prodotti AM, danno la possibilità ai loro clienti sul sito web di modificare alcuni parametri del design; le aziende fornitrici di questi servizi stanno cercando di rendere i prodotti sempre più personalizzabili con il co-design per accrescere ancora di più il valore percepito dai loro clienti (Weller et al., 2015). Andiamo a comprendere ora come può variare il design della SC anche sulla base di quest'analisi economica. La struttura tradizionale vista nella sezione precedente è una struttura centralizzata, basata sulla produzione di massa; la tecnologia AM può cambiare questo paradigma, muovendosi sempre di più verso una struttura della SC decentralizzata per una produzione su piccola scala. Infatti, questa tecnologia permette di produrre pezzi

singoli su domanda; in molti casi si riescono a produrre questi pezzi vicino o direttamente nel punto di utilizzo del pezzo, portando ad una diminuzione significativa dei lead-time. Per la produzione in loco, idealmente potrebbero bastare solamente la stampante, il disegno CAD del pezzo da stampare e la materia prima per realizzarlo (Ghobadian et al., 2020). Non è neanche necessario un centro di produzione ad hoc per la realizzazione di questi prodotti; si necessita solo di un operatore specializzato che sappia utilizzare la stampante o che, nel caso di un pezzo da progettare da zero, conosca le tecniche di progettazione CAD. Un ulteriore impiego dell'operatore avviene nella fase di pre e post lavorazione per un tempo decisamente inferiore, rispetto al tempo di lavorazione (Verboeket & Krikke, 2019).

La tendenza per negli anni futuri, sarà quello di un aumento dell'automazione di queste fasi, con diminuzione dell'impiego di manodopera, che rende interessante il trade-off a livello economico tra scelta di produrre nel proprio paese o dare l'attività in outsourcing con minor costo della manodopera (Laplume et al., 2016). Anche a livello di investimenti per utensili il costo sostenuto dall'azienda sarebbe minore con l'adozione dell'AM. Da questo punto di vista, l'introduzione dell'AM potrebbe anche portare una semplificazione della catena di approvvigionamento della materia prima (*procurement*), in quanto è necessario un solo materiale per la realizzazione del prodotto. Un vantaggio dei materiali impiegati nell'AM è la loro non specificità e l'essere facilmente trasportabili all'ingrosso (Rylands et al., 2016). Inoltre, la tecnologia AM in molti casi può portare ad un'ulteriore semplificazione nell'approvvigionamento dei componenti, poiché i pezzi realizzati sono già progettati per avere un unico design integrato senza l'utilizzo di componenti esterni. La grossa novità che potrebbe portare l'AM è la possibilità di avere la presenza di macchine, non solo nel centro di produzione, ma anche presso i retailer o presso i magazzini degli LSP (Zijm et al., 2019). A livello quindi di ampiezza orizzontale, una SC con al suo interno l'utilizzo della tecnologia di AM si configura quindi a livello teorico come più corta, veloce e flessibile a rispondere ad eventuali interruzioni della SC; rispetto al tema del reshoring, questa tecnologia fa prospettare un aumento di questa tendenza,

anche perché permette di evitare la dispersione geografica generata dalle politiche di offshoring che spesso è causa di disruption (maggiore probabilità di interruzioni di trasporti per eventi esterni). Il minor utilizzo di manodopera grazie all'utilizzo di processi AM è un altro fattore che porta ad un aumento del fenomeno del reshoring, poiché nei costi aziendali non diventa più rilevante il basso costo della manodopera nei paesi in via di sviluppo che è stato un fattore spesso determinante nelle decisioni di outsourcing delle attività (Zijm et al., 2019). La natura digitale dell' AM rappresenta uno dei potenziali vantaggi e potenzialmente una delle più grandi fonti di cambiamento per il ridisegno della SC. L'impiego di un file CAD rende più facile la condivisione del prodotto, la possibilità di apportare modifiche per la personalizzazione di esso e il riuso del progetto stesso; questa situazione tende a favorire la presenza di outsourcing delle attività ad aziende AM esterne (Eyers and Potter 2015). Basti pensare a quanto critica è la modifica di uno stampo per la realizzazione di un prodotto in outsourcing; è necessario formare una manodopera altamente specializzata nel partner AM in outsourcing, ma rimangono i rischi dello scambio corretto di informazione, oppure sostenere i costi d'invio del nuovo stampo modificato, con tutte le problematiche legate ai lead time del trasporto o ad eventuali ritardi. Invece con la tecnologia AM è possibile riuscire ad interfacciarsi con un numero elevato di aziende differenti e allo stesso tempo poter scegliere senza vincoli l'azienda di servizi AM più vicina al punto di interesse della domanda (Berman, 2012).

È interessante come in questo redesign, le aziende di servizi AM diventino degli attori fondamentali all'interno della SC: la caratteristica di general-purpose dell'AM, permette a queste aziende di ricevere numerose attività in outsourcing da un vasto numero di aziende e in molti casi di diversi prodotti dalla stessa azienda. L'investimento economico di queste aziende nelle macchine non è quindi specifico per una singola azienda; il loro obiettivo diventa quella di aumentare l'utilizzo di queste macchine, con lo scopo di riuscire a raggiungere economie di scala per quello che riguardano i costi fissi, come ad esempio il costo del riscaldamento delle macchine che con un alto utilizzo delle macchine può essere ammortizzato su più prodotti realizzati

(Meyer et al., 2021). Il problema più grande sia per queste aziende, che per le aziende produttrici rimane la difficile automatizzazione della fase di post-processo, che richiede per la maggior parte degli interventi un lavoro manuale; per questo motivo si può considerare questa fase il vero collo di bottiglia di questo tipo di SC, sia a livello di tempi che a livello di costi (Baumers et al. 2016). Secondo uno studio di Wohlers Associates del 2021, la fase di post-produzione impatta circa per il 30% dei costi della produzione di un prodotto realizzato con AM. Si può quindi dire che a livello di integrazione verticale, l'introduzione dell'AM nella SC andrebbe a portare una decentralizzazione dell'attività, tramite l'aumento dell'outsourcing: grazie a questa tecnologia però si potrebbe realizzare questo senza una complicazione della catena logistica, poiché lo scambio delle informazioni è digitale ed immediato ed è più facile scegliere il luogo dell'outsourcing vicino al punto di bisogno della domanda.

Si configura pertanto come l'AM sia tra le tecnologie più adatte per il raggiungimento del concetto di Direct Manufacturing (DM). Da letteratura, per Direct Manufacturing si intende la manifattura di prodotti a molteplici livelli e in differenti località. Questa filosofia ritiene possibile la sostituzione della produzione di massa centralizzata, con produzioni flessibili e distribuite all'interno della catena di produzione, impiegando centri di produzione locali. Come conseguenza, questo tipo di produzione ha come obiettivo la possibilità di veloci tempi di consegna e di una produzione on-demand di prodotti personalizzati. La realizzazione di questo concetto va di pari passo ed è estremamente collegata con lo sviluppo dell'industria 4.0, tra le cui tecnologie fa parte anche l'AM; è necessario per la sua completa diffusione che ci sia uno sviluppo dell'infrastruttura tecnologica (sensori, strumenti di automazione, dispositivi IoT) che permetta uno scambio di informazioni e un controllo in tempo reale (Srai et al. 2016).

È importante per lo sviluppo di queste catene logistiche stabilire la corretta posizione dell'order-penetration-point (OPP): questi punti sono i luoghi in cui arriva l'ordine del cliente e inizia la customizzazione del prodotto. Più a monte è la posizione di questo punto, maggiore sarà la possibilità di customizzare e di differenziare il prodotto; questa strategia permette alle aziende di riuscire a convivere e ad affrontare l'incertezza della

domanda (Burns, 2004). La tecnologia AM permette di spostare gli OPP sempre più a monte nella struttura logistica rispetto alle tecniche tradizionali, grazie alla possibilità di customizzare il prodotto in fase di progettazione assieme al cliente senza costi aggiuntivi; inoltre, questa situazione sposta le logiche di produzione da una situazione Make To Stock (MTS) a scenari di produzione Make To Order (MTO) o in molti casi addirittura Engineering To Order (ETO) (Verboet Krikke 2019). Si procede ora ad analizzare come cambia strutturalmente la SC, anche con l'aiuto delle figure sotto riportate. Nella figura 26 è riportato un esempio di struttura SC centralizzata con AM, con i relativi flussi sia a livello di realizzazione del prodotto, che a livello di passaggio di informazioni: in questa tipologia di struttura, il flusso del disegno CAD rimane all'interno del centro di produzione. Si può notare come rispetto al caso di SC centralizzata non sia presente la fase di procurement dei componenti: in alcuni casi la presenza della tecnologia AM è necessaria non per produrre il prodotto finito, ma per realizzare quei componenti del prodotto che possono essere critici a livello di approvvigionamento (Li, 2017).

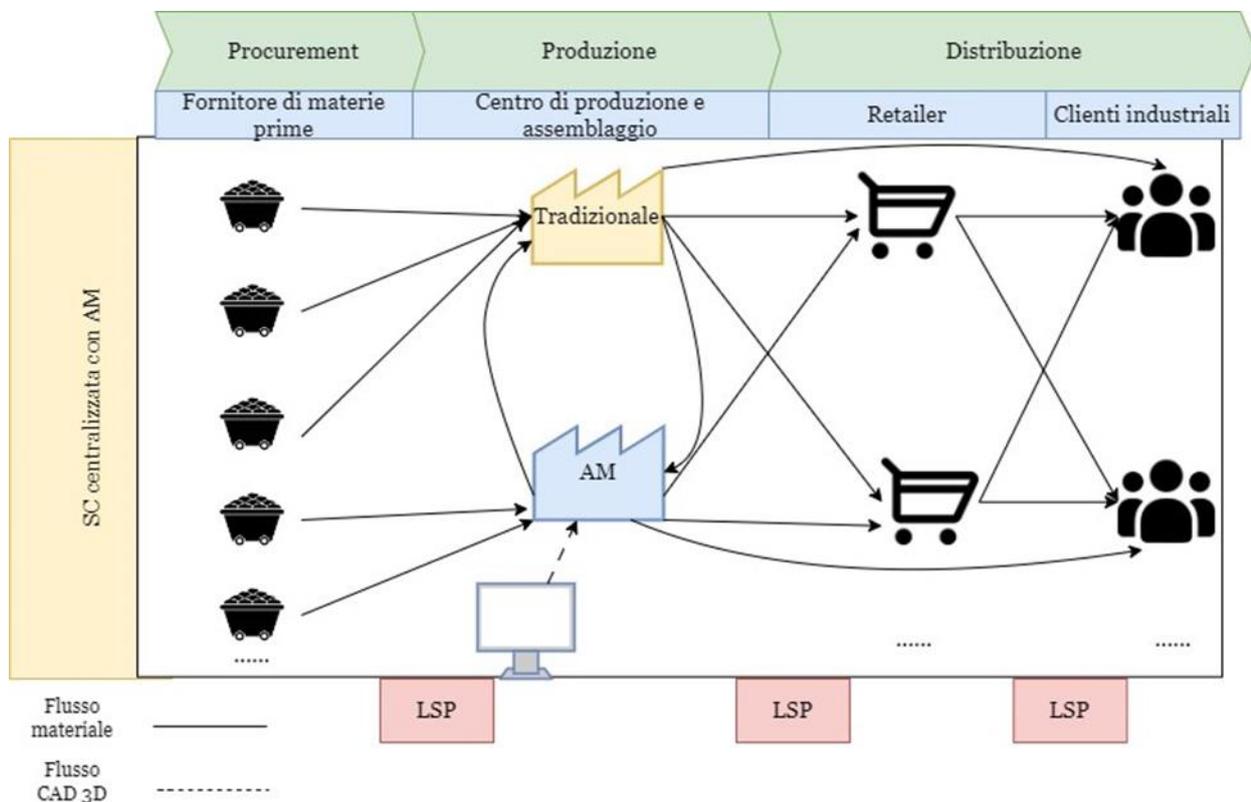


Figura 26: struttura AM centralizzata

È importante notare come all'interno di questa struttura possa continuare ad esserci il magazzino dei prodotti finiti per alcune tipologie di prodotto con componenti in AM. Per i prodotti realizzati in AM, il flusso del prodotto è subito diretto al retailer, senza il bisogno di avere un magazzino prodotti finiti presso il proprio centro produttivo; solitamente quest'ultimo vale per componenti o ricambi realizzati in AM che hanno una bassa domanda con grandi picchi e senza avere un tempo di risposta critico. I magazzini dei componenti e dei ricambi progettati originalmente all'interno del centro di produzione, possono essere riutilizzati come magazzino dei prodotti finiti o come magazzino delle materie prime, necessarie alla realizzazione dei prodotti AM.

Si può dividere ulteriormente questa tipologia di struttura in due diverse configurazioni una denominata in house-configuration e l'altra outsourced-configuration: la prima prevede la scelta di installare il proprio centro di produzione additive all'interno della propria azienda. Secondo la letteratura, questa scelta viene intrapresa in particolar modo dalle grandi aziende che avendo la struttura in casa riescono a sviluppare con gli investimenti tutta una serie di competenze interne che garantisce all'azienda un vantaggio competitivo; inoltre, la reputazione di queste grandi aziende può essere utilizzata per offrire i servizi AM sviluppati all'interno dell'organizzazione ad industrie più piccole che si affacciano sul mercato AM, senza però il budget necessario per fare investimenti interni. La scelta da parte di alcune aziende per la configurazione centralized-outsourced consiste nell'affidare a uno o più AM service vicini al centro di produzione, la produzione di alcuni prodotti, in particolar modo per la fase di prototipazione e produzione utensili. Solitamente, questi rapporti nascono con bassi volumi di prodotti e poi crescono nel corso del tempo; un punto di forza per far funzionare questo rapporto è la vicinanza geografica tra le due parti che permette una stretta collaborazione e una veloce coordinazione anche per rispondere alle variazioni della domanda e delle caratteristiche del prodotto. Queste strutture centralizzate garantiscono un ottimo livello di servizio e un basso rischio di stock-out, in particolar modo per la produzione di componenti e ricambi dove è garantita la customizzazione del prodotto, senza incorrere in ulteriori costi (Friedrich et.2021).

Si analizza ora la figura 27, dove in questo caso è rappresentata una SC decentralizzata con utilizzo di AM: come già visto precedentemente, il flusso del materiale non deve più affrontare la fase di procurement dei vari componenti.

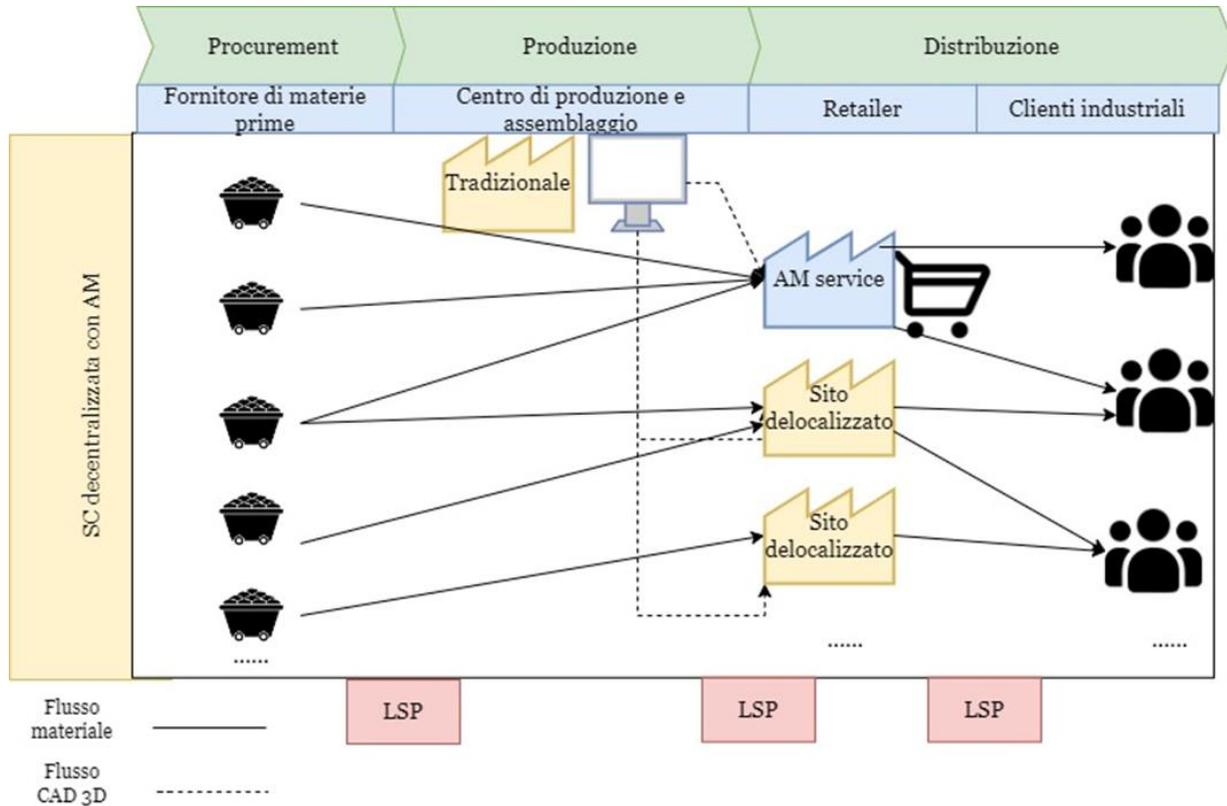


Figura 27 struttura AM decentralized-in house

In questa tipologia di struttura, il flusso di materiale non è più diretto al centro di produzione, ma direttamente al retailer, alla filiale locale o all'impianto di manutenzione legato al contesto industriale. In questo caso, oltre al flusso di materiale, è molto importante considerare il flusso informativo del disegno CAD, realizzato presso l'impianto di produzione centrale, inviato ai vari siti di produzione decentralizzati (Eyers and Potter, 2015). Si noti come all'interno di questa struttura si possa comunque scegliere di progettare una struttura ibrida ancora più frammentata, mantenendo una parte della produzione AM all'interno del proprio centro di produzione e decidendo di commissionare ai siti decentralizzati la realizzazione di prodotti on demand, vicini al loro luogo di utilizzo; in questa tipologia di struttura non vi è più un magazzino prodotti finiti in quanto la produzione dei prodotti per i retailer

viene inviata direttamente a loro e non è più necessario disporre un magazzino centrale per questa tipologia di prodotti.

Anche in questo caso si possono identificare due configurazioni diverse della struttura quella decentralized-in house e quella decentralized-outsourced. Nel primo caso, l'azienda centrale implementa all'interno della sua catena logistica la tecnologia AM, inserendo i siti di produzione in siti già esistenti di proprietà dell'azienda, differenti però dal centro di produzione principale. Questa configurazione viene spesso adottata per eseguire una produzione più vicina alla domanda, mantenendo però il controllo della produzione sotto l'egida aziendale, garantendo quindi ai clienti finali lo stesso livello di qualità del servizio con un lead time minore. Per quanto riguarda la configurazione decentralized-outsourced, questa viene adottata con vari livelli di complessità e per scopi diversi. Una parte della letteratura presenta come molte aziende scelgano di dare in outsourcing la propria produzione ad AM service per rare tecnologie AM per la realizzazione di prodotti di alta qualità: in questo caso la scelta non viene guidata dalla locazione dell'AM service vicino al luogo della domanda, ma alle conoscenze di esso sulla produzione di oggetti di alta qualità. In altri casi, viene scelto l'outsourcing poiché all'interno del centro di produzione principale non vi è sufficiente capacità produttiva per soddisfare la domanda: si decide di esternalizzare la produzione presso AM service cercando a questo punto quelli più vicini al luogo di domanda del prodotto (Friedrich et.2021). Una rappresentazione di questo tipo di struttura è riportata a seguire nella figura 28. In questo caso nella SC, l'azienda produttrice affida in outsourcing a un AM service bureau la produzione dei prodotti AM, progettando e inviando i file CAD per la realizzazione degli stessi: analizzando la SC nella sua interezza, si nota come a questi AM service arrivino più flussi da centri di produzione diversi, essendo che da parte loro viene destinata la produzione di numerosi prodotti. Si forma quindi presso gli AM service bureau un pooling di produzione che è fondamentale per la sopravvivenza di queste entità: infatti solo attraverso l'utilizzo continuo delle macchine si può ritornare dagli investimenti eseguiti e sfruttare le

piccole economie di scala dell'AM presenti, specie nella fase di riscaldamento delle macchine.

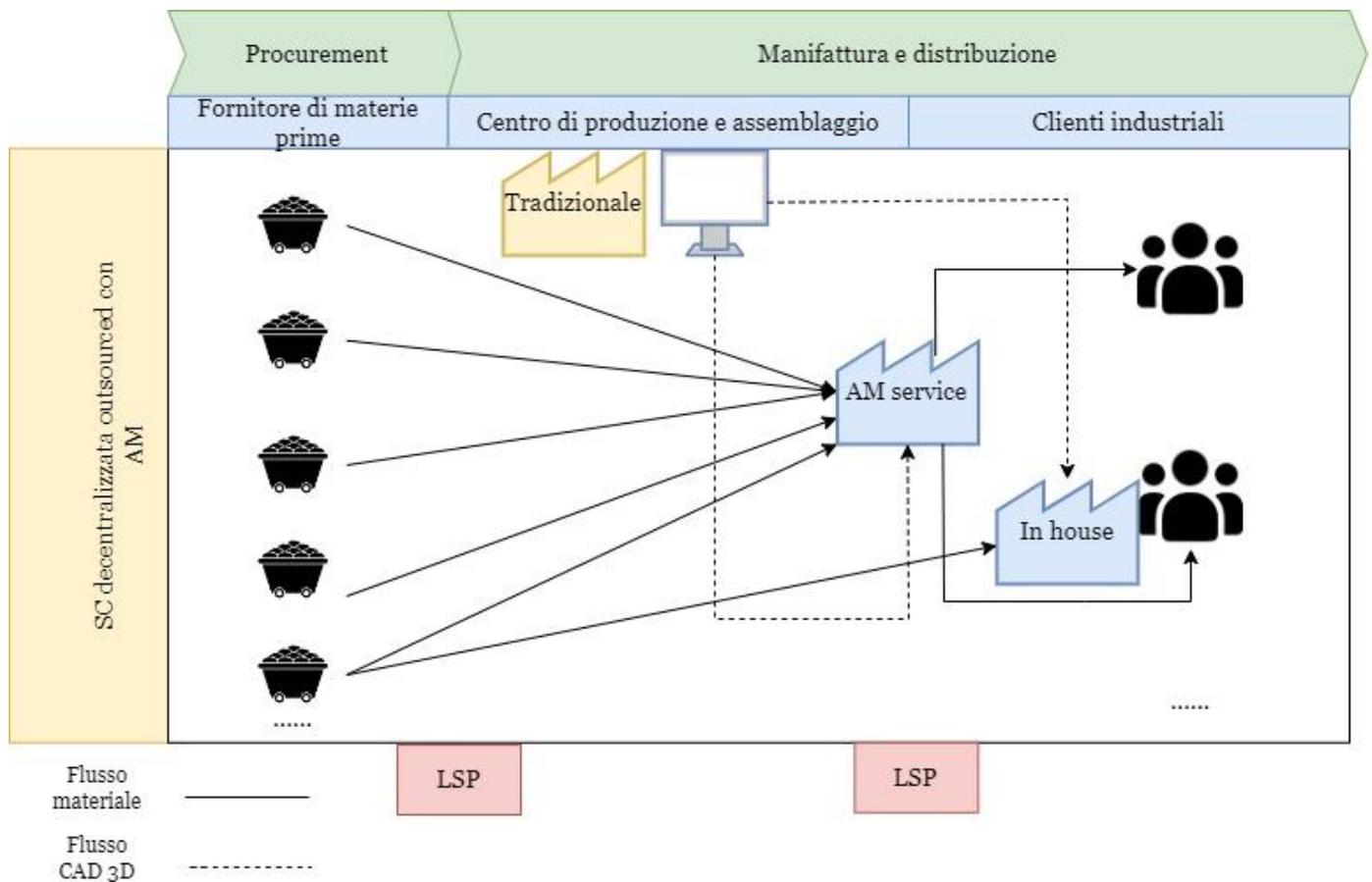


Figura 28 struttura AM decentralized-outsourced

Il grande vantaggio di questi AM service è la possibilità di collaborare con un vasto numero di aziende di settori diversi, poiché la stessa tipologia di macchina permette di produrre prodotti diversi, senza però i tempi di set up e il costo della realizzazione di stampi diversi richiesto dalle macchine tradizionali (Oeberg, 2019). Si può osservare in figura 28 una possibilità di struttura ancora di più estremizzata nel caso in cui il consumatore finale sia direttamente anche il produttore del prodotto finale: in questa situazione, il consumatore acquista dall'azienda produttrice il disegno CAD del pezzo e lo realizza nella propria abitazione, tramite la sua stampante AM hobbistica.

In questa tipologia di struttura, i magazzini relativi ai componenti e ai ricambi non sono presenti nei siti delocalizzati: all'interno di questi siti, gli unici magazzini presenti sono quelli relativi alle materie prime, molto numerosi, ma che comunque hanno un costo

di mantenimento minore rispetto ai magazzini centrali che sono più costosi e di dimensione maggiore. Con la struttura decentralizzata diminuisce la dipendenza dei fornitori di componenti, ma aumenta la dipendenza e il bisogno di una relazione forte con i fornitori di materie prime, che sono prodotti critici nella catena logistica. Dal punto di vista del livello di servizio del cliente, questa è la situazione migliore poiché si evitano eventuali ritardi legati al trasporto presso il cliente finale; d'altra parte questa soluzione rischia di avere a livello energetico su tutta la SC un consumo maggiore in quanto le varie stampanti domestiche vengono impiegate per la produzione di un singolo pezzo e non vi è un loro utilizzo continuo come nel caso degli AM service in cui si riescono ad abbattere parzialmente i consumi legati all'accensione delle macchine (Gallinaro, 2023). Nel contesto della produzione domestica, è emerso un altro problema per la tecnologia AM che è quello legato ai diritti di proprietà intellettuale. Dall'inizio della diffusione di queste macchine per scopo domestico, è iniziato un dibattito per proteggere e legiferare su questi diritti, tra cui quelli di design, copyright e quelli legati ai brevetti: l'obiettivo è quello di tutelare i creatori e il loro lavoro di design. Sono già previste sanzioni nei casi in cui questi prodotti venissero realizzati senza il permesso dei creator, ma riguardo all'uso domestico sono ancora molto difficili da applicare. Proprio per queste difficoltà nella struttura decentralized-outsourced vista precedentemente si cerca di dare in out-sourcing prodotti che non necessitino di proprietà intellettuale, proprio per evitare problemi di carattere legali, in quanto la legislazione in molti paesi non è ancora chiara (Wang et al.2021).

### **Impatto sulle metriche della SC**

A livello quantitativo la letteratura presenta alcuni casi studio che vanno a confrontare i vari costi e valori di performance tra l'adozione di una struttura AM centralizzata e una struttura AM decentralizzata; uno studio pubblicato nel 2021 ( Rinaldi et. 2021), ha simulato un sistema confrontando tre configurazioni diverse di SC ( centralizzata

tradizionale TM, centralizzata AM, decentralizzata AM) analizzando come misure di performance la supply chain lead time (SCLT), il costo di inventario facendo variare il service level desiderato. Viene evidenziato come una SC AM decentralizzata presenti una minore sensibilità all'aumento del costo dell'inventario con l'aumento del service level desiderato ( 4% per decentralizzata AM, 16 % per centralizzata AM, 25% per centralizzata TM); un trend simile si nota anche nell'aumento del SCLT che già minore per la struttura decentralizzata AM, si dimostra meno sensibile al variabile del service level. L'analisi effettuata ipotizza l'impiego di 2 macchine nella struttura tradizionale, 15 nella struttura centralizzata AM e 16 nella struttura decentralizzata AM. Uno studio pubblicato nel 2018 (Ghadge et al. 2018) esamina e confronta l'impatto dell'AM sulla SC dei ricambi nel settore aerospace negli USA; lo studio prende in considerazione la SC di un'azienda del settore aerospace che opera con tecnologia tradizionale per la distribuzione dei ricambi e ipotizza di inserire nei nodi di arrivo della SC, macchine con tecnologia AM eliminando la presenza di un Original Equipment Manufacturer (OEM) centrale. Lo studio mostra come il livello aggregato di inventario mostri una significativa riduzione ( circa del 25%), oltre che ad avere minori oscillazioni nell'aggregato per quanto riguarda l'AM: questa riduzione dell'inventary level avviene grazie a un minore lead time di riempimento del magazzino, possibile nel caso di un sistema con produzione on-demand come quello AM implementato. Come nello studio precedentemente citato, anche in questo viene evidenziato come il costo di mantenimento dei pezzi sia minore per la tecnologia AM. Un aspetto interessante dello studio è legato alla variazione della variabilità della domanda, dove emerge come con la tecnologia tradizionale si riesca a fronteggiare scenari di alta variabilità della domanda (3sigma) grazie ai livelli più alti d'inventario, rispetto alla situazione AM; una possibile soluzione per fronteggiare questa situazione potrebbe essere quella di inserire buffer specifici come safety-stock.

Questi studi citati hanno come limite la mancanza di quantificazione del costo delle macchine e di un costo penalità per il non soddisfacimento della domanda e quindi non sono in grado di definire a livello economico generale quale sia il miglior scenario da

adottare tra una struttura tradizionale e una con AM: essendo il numero di macchine simile, lo studio di Rinaldi sembrerebbe affermare che la struttura decentralizzata AM garantisca rispetto a una struttura centralizzata AM SCLT minori e un minore aumento dei costi all'aumento del livello di servizio desiderato.

A livello di confronto tra strutture centralizzata AM e decentralizzata AM uno studio condotto nel 2017 (Yi et al. 2017) mette in relazione il costo totale della catena, considerando i costi delle macchine e di penalità nel caso di cliente non servito facendo variare il numero di macchine nei due sistemi; lo studio mostra come per basse quantità di macchine AM nel sistema (es.8) è preferibile a livello di costi nel sistema una struttura AM centralizzata, mentre all'aumentare delle macchine si raggiunge il pareggio fino ad arrivare a uno scenario in cui è preferibile adottare una struttura AM. Viene messo in risalto che a parità di macchine la configurazione AM decentralizzata presenta un tempo di attraversamento del sistema minore rispetto a una struttura centralizzata AM, solamente dopo un certo livello di macchine nel sistema, mentre nel caso precedente appariva come sicuramente più conveniente a livello di attraversamento del sistema. In questo studio di Yi, la soluzione che viene poi proposta come più conveniente in termini di attraversamento del sistema è una configurazione mista centralizzata a monte e decentralizzata a valle; inoltre viene evidenziato come all'aumentare del tasso di produzione e dell'efficienza tecnologica delle macchine possa essere consigliabile dirigere la propria struttura verso una configurazione decentralizzata AM.

Uno studio interessante dal punto di vista numerico è quello pubblicato da Khajavi del 2018, sempre riguardante la SC dei ricambi negli Stati Uniti, in questo caso riguardante il settore aeronautico. In questo studio viene analizzata la produzione di un ricambio (F-18 Super Hornet environmental control system) in tre differenti configurazioni (centralizzata, distribuita, hub), con tipologie di macchine diverso per costo d'acquisto e tasso di produzione analizzando tutti i costi all'interno della catena logistica, tra cui anche quello del personale addetto alla gestione delle macchine AM. Lo studio parte da un precedente lavoro di Khajavi del 2013 dove si affermava che allo state of art

dell'epoca risultava nettamente profittevole la configurazione centralizzata rispetto a quella decentralizzata ( delta di circa 700,000 \$) e ad hub ( delta di circa 100,000\$); molta della differenza era data dal costo in macchine molto elevato all'epoca e dal costo del personale addetto più alto per una struttura decentralizzata, con i minori costi di trasporto di quest'ultime due non in grado di compensare queste ampie differenze. Successivamente lo studio analizza due scenari con due differenti tipi di macchina (Norge Ice 9 e Norge Ice 1), la prima delle due con un tasso di produzione 3 volte superiore alla seconda e con un costo per macchina di circa 10 volte inferiore rispetto alla situazione del 2013. In questi scenari esplorati, la configurazione ad hub si dimostra competitiva tanto quanto quella centralizzata, addirittura migliore nel caso della Norge Ice 9. L'ultimo scenario esplorato riguarda l'impiego di una macchina ideale con una diminuzione significativa dei tempi di set-up e in questo scenario la configurazione migliore è quella decentralizzata poiché diminuisce significativamente il costo nel personale addetto a livello di tempo, con il vantaggio di non avere costi di trasporto. Si evince pertanto come per la scelta di uno scenario distributed AM sia importante tenere in considerazione l'impiego di macchine con bassi tempi di set-up che possono andare ad impattare sulla profittabilità del sistema, mentre invece per una configurazione hub sia importante di verificare che ci sia un adeguato tasso di produzione che permettono a questa configurazione di avere vantaggi a livello di costi. Si inizia a notare quindi che non sia immediato definire con certezza quale possa essere la configurazione migliore in assoluto a livello economico tra una struttura AM decentralizzata, centralizzata e una centralizzata tradizionale; ci sono delle tendenze a livello di vantaggi per le varie tipologie di struttura come ad esempio quella AM decentralizzata per quanto riguarda la diminuzione del tempo di attraversamento del sistema, ma vanno sempre prese in considerazione le condizioni di partenza in cui ci si trova come ad esempio il numero di macchine disponibili per scegliere la configurazione più profittevole per i propri obiettivi. Il caso studio di Khajavi è significativo su come a seconda dello scenario che si va ad esplorare e delle sue

condizioni a contorno (nel caso specifico la tipologia di macchine impiegate) possano risultare più profittevoli a livello economico una o l'altra configurazione.

Condizione necessaria per attivare questo processo di decentralizzazione è la presenza di strutture ICT efficienti e moderni che permettano uno scambio di informazioni efficiente e rapido lungo tutta la catena: nei primi tentativi di decentralizzazione, struttura ICT non all'avanguardia hanno rappresentato un collo di bottiglia per la catena logistica. È quindi fondamentale per le aziende che intendono decentralizzare la propria SC, verificare che ci sia un'adeguata infrastruttura ICT per i loro bisogni e nel caso in cui non ci fosse, prevedere investimenti anche in questo ambito (Verboeket, Krikke 2019). Il tema degli investimenti è centrale nello sviluppo di queste strutture e può rappresentare una delle maggiori barriere all'ingresso per molte aziende che intendono modificare la loro SC. Sia una struttura centralizzata con AM che decentralizzata con AM comportano numerosi investimenti iniziali in macchine e attrezzature AM; inoltre, oltre a questi costi difficili da ammortizzare per la mancanza di economie di scala, vanno considerati i costi fissi a livello energetico per il funzionamento delle macchine e l'aumento dei costi delle materie prime (materiali impiegati per alcune tipologie di prodotto sono rari) che sono dei limiti importanti alla diffusione di queste nuove strutture (soprattutto in quella decentralizzata dove i costi fissi sono moltiplicati per la presenza di numerose macchine lungo la catena) (Cootteler, 2014).

Questi cambiamenti nella struttura della SC con AM devono essere accompagnati di pari passo con una riformulazione dei ruoli aziendali all'interno delle nuove strutture. Il problema maggiore rimane quello affrontato nel capitolo precedente legato alla conoscenza della tecnologia AM: molte aziende ridisegnano la loro SC, con al suo interno l'introduzione della tecnologia AM, senza però avere le competenze necessarie e anche l'adeguata divisione dei ruoli per permettere il corretto funzionamento della catena (Oettmeier and Hoffman, 2016).

Un altro aspetto importante è la gestione delle relazioni con i fornitori, che con queste tipologie di struttura di SC diminuiscono per quanto riguarda la fornitura di

componenti; inoltre, le operazioni di procurement delle materie prime subiscono una standardizzazione. A livello di vantaggio competitivo, diventa un fattore critico di successo la corretta collaborazione tra le aziende produttrici e le aziende fornitrici delle macchine di produzione additiva; in particolare, è importante che nelle prime fasi di lavoro ci sia una stretta collaborazione tra l'azienda produttrice e l'azienda fornitrice per acquisire le conoscenze necessarie sulle potenzialità delle stampanti e sui materiali impiegati. I tempi per acquisire la piena competenza su questo tipo di tecnologie non sono brevi e quindi è importante formulare un piano industriale a lungo termine per riuscire ad avere un ritorno dall'investimento eseguito (Calignano,2023).

Secondo numerosi studi, è molto importante per la creazione di questa nuova struttura di SC, che oltre alle aziende, ci sia una reazione da parte dei LSP nell'adattarsi a questo nuovo modello di business e a questa nuova tecnologia (Friedrich 2021). L'aspettativa è quella che gli LSP riformolino il loro business, con modelli AM specifici, in modo da controbilanciare le perdite dovute all'abbandono delle vecchie forme di business; si ritiene che gli LSP continueranno a collaborare con i clienti esistenti, dovendo però riuscire a creare una posizione nel business AM, identificando prima i nuovi modelli e capendo quale sia il valore aggiunto per gli LSP all'interno di questo nuovo ecosistema. Inoltre, gli LSP devono sfruttare a loro vantaggio le potenzialità portate dalle altre tecnologie digitali dell'Industria 4.0 ( robot, droni, veicoli automatizzati), che devono essere integrati all'interno della nuova SC modificata dall'introduzione dell'AM (Mathauer & Hofmann, 2019).

La letteratura offre numerosi esempi di come gli LSP si sono approcciate e si approcceranno con modalità differenti. Il primo inserimento possibile degli LSP all'interno della struttura è quello come produttore di oggetti con la tecnologia AM, all'interno di magazzini esistenti decentralizzati e dei centri di produzione degli LSP; questa struttura è molto simile alla configurazione decentralized-in house vista precedentemente. Nella visione degli LSP come produttore si sono ipotizzate e realizzate anche configurazioni differenti: una di queste prevede la creazione di piccole stazioni di produzione all'interno di snodi logistici cruciali come porti o aeroporti (de

la Pena Zarzuelo, 2020). Un'altra possibile opzione è la creazione da parte degli LSP delle cosiddette printing hubs che sono strutture simili a quelle offerte dagli AM service di professione, situate in luoghi strategici, cercando di massimizzare l'utilizzo delle macchine impiegate e di diminuire il costo del trasporto (Oeberg, 2019). Un'ulteriore possibile opzione ancora in fase di sviluppo è la realizzazione da parte degli LSP dei cosiddetti "moving trucks" ovvero dei camion adibiti sia al trasporto, ma anche alla produzione di parti AM, abbattendo in questo modo i lead time di produzione (Hofmann&Ostwalder, 2017). Il secondo inserimento possibile degli LSP all'interno della SC è quello come provider dei tradizionali servizi logistici (ruolo affidato solitamente agli operatori 2PL): uno scenario possibile è l'offrire il trasporto e lo stoccaggio delle materie prime critiche attraverso partnership specifiche con le aziende produttrici. Un secondo scenario possibile è una stretta collaborazione tra gli LSP e gli AM service, per l'efficientamento del trasporto dell'ultimo miglio dei prodotti finiti dagli AM service ai clienti finali (Pause&Marek, 2019). Gli LSP potranno inserirsi anche spostandosi da quello che è il loro core business offrendo servizi digitali alle aziende produttrici, come software e programmi per il designo dei file CAD, che permettano la condivisione lungo tutta la filiera logistica, proteggendo la proprietà intellettuale di esse competitori esterni. Un ulteriore ruolo possibile descritto in letteratura è quello di consulente esterno all'azienda per la progettazione della SC, per la scelta dei materiali, delle tecnologie AM e degli AM service. Gli LSP possono entrare all'interno di questa nuova struttura di SC con differenti modalità, anche in base al loro ruolo principale di partenza: in molti casi, possono entrare all'interno della struttura allo stesso tempo come produttore, trasportatore, consulente e fornitore di servizi di digitali (Pause&Marek,2019).

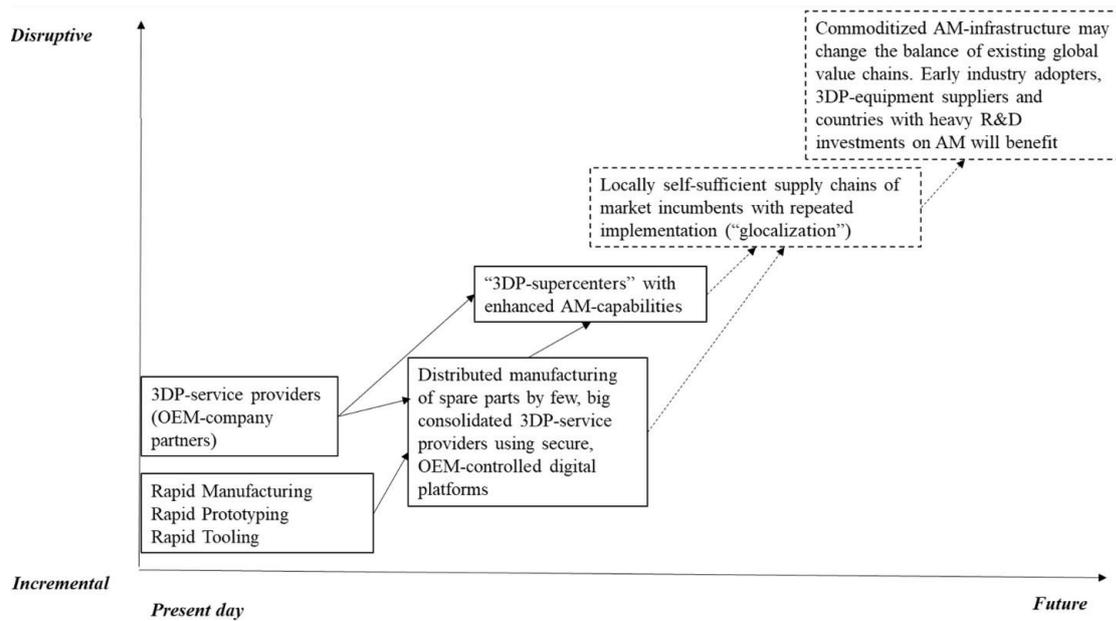


Figura 29: grafico su diffusione business-models (Savolainen)

La figura 29 sopra riportata (Savolainen, 2018) rappresenta un possibile andamento futuro per quanto riguarda i modelli di business dell'AM all'interno della SC: si nota come al momento il modello di business prevalente legato è ancora quello del rapid manufacturing e del rapid prototyping, con una presenza dei 3DP-service providers come potenziale elemento disruptive all'interno delle SC. La prospettiva, come anche visto in precedenza, è quella per il futuro di un'evoluzione di questi 3DP-service per arrivare allo sviluppo di una SC con Distributed Manufacturing gestita da 3DP-supercenter.

Si riassume nelle tabelle qua riportate le considerazioni effettuate precedentemente analizzando svantaggi e vantaggi dell'adozione dell'AM rispetto a una tecnologia tradizionale, dell'adozione di un SC centralizzata con AM e dell'adozione di un SC decentralizzata con AM.

### Riassunto confronto tecnologia AM vs tecnologie tradizionali

	Vantaggi	Svantaggi
<b>COSTI</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Investimenti minimi in attrezzatura</li> <li>• No costi di assemblaggio</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alto costo e poca disponibilità delle materie prime</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Minor lavoro manuale</li> <li>• Assenza di magazzino per i prodotti finiti e i componenti</li> <li>• Minor consumo di materiale per realizzare il prodotto</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alti prezzi delle macchine</li> <li>• Costi di post-processo</li> <li>• Alto consumo di energia</li> <li>• Basse economie di scala</li> </ul>
<b>TEMPI</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Minori lead time e minor time-to-market</li> <li>• Ciclo di vita più lungo del prodotto</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lenti throughput time</li> </ul>
<b>FLESSIBILITA'</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Customizzazione del prodotto senza costi extra</li> <li>• Grande libertà di progettazione e possibilità di costruire geometrie complesse</li> </ul>	
<b>QUALITA'</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Grande affidabilità dei prodotti con geometrie complesse</li> <li>• Possibilità di lavorare materiali non lavorabili con le tecnologie tradizionali</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Le materie prime non possiedono in tutte le situazioni, le stesse caratteristiche dei materiali tradizionali</li> <li>• Difficoltà nella standardizzazione dei prodotti per garantire sempre la stessa qualità dei prodotti</li> </ul>
<b>ALTRI</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maggiore willingness-to-pay dei clienti</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mancanza di chiarezza legata alla proprietà dei diritti intellettuali del prodotto</li> </ul>

		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Limitata grandezza delle macchine e di conseguenza dei prodotti</li> </ul>
--	--	---

Tabella 1: Riassunto confronto tecnologia AM vs tecnologie tradizionali

### Riassunto pro-contro SC AM centralized

	Vantaggi	Svantaggi
<b>COSTI</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Riduzione dei costi di magazzino per i prodotti, componenti e ricambi con una domanda fluttuante</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Costi fissi centralizzati più alti per le macchine additive</li> <li>• Costi più alti per il magazzino delle materie prime</li> <li>• Alti costi dell'energia</li> </ul>
<b>CUSTOMIZZAZIONE</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alto grado di personalizzazione del prodotto senza costi-extra</li> </ul>	
<b>RISCHI</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Minori rischio di stock out dei componenti e dei ricambi con AM</li> </ul>	
<b>TEMPI</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Throughput più lento dei prodotti</li> </ul>

Tabella 2: Riassunto pro-contro SC AM centralized

### Riassunto pro-contro SC AM decentralized

	Vantaggi	Svantaggi
<b>COSTI</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Minore costo di trasporto</li> <li>• Minore costo di stoccaggio</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Moltiplicazione dei costi fissi</li> <li>• Costo più alto delle macchine AM</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Minore consumo di combustibile fossile (minore impatto ambientale)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Investimenti maggiori nelle strutture IT</li> </ul>
<b>CUSTOMIZZAZIONE</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta personalizzazione di unità o piccoli lotti senza costi extra</li> <li>• Possibilità di conoscere direttamente il cliente e i suoi specifici bisogni</li> </ul>	
<b>TEMPI</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tempi di consegna più veloci</li> </ul>	
<b>COMPETENZE</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Non viene richiesta una specifica competenza per le produzioni on site</li> </ul>	
<b>RISCHI</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Meno dipendenza dai fornitori di componenti</li> <li>• Minor rischio di stock out dei componenti e dei prodotti finiti</li> <li>• Meno rischio di danneggiamento della merce durante il trasporto</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumento della dipendenza dai fornitori AM delle materie prime</li> </ul>

Tabella 3: Riassunto pro-contro SC AM decentralized

# Capitolo V

## L'AM e la SC nei vari settori

In questo capitolo si vanno ad analizzare esempi (esempi reali, casi studio e cambiamenti a livello di strutture) di introduzione di AM all'interno delle SC dei settori industriali più significativi e importanti per quanto riguarda la tecnologia AM (medicale, automotive, energetico, aerospace). Prima di scendere nel dettaglio dei vari settori, è interessante citare un sondaggio eseguito nel 2019 dove era stato interpellato un pool di aziende per capire quali fossero le caratteristiche relative più d'interesse per il loro settore di applicazione all'AM.

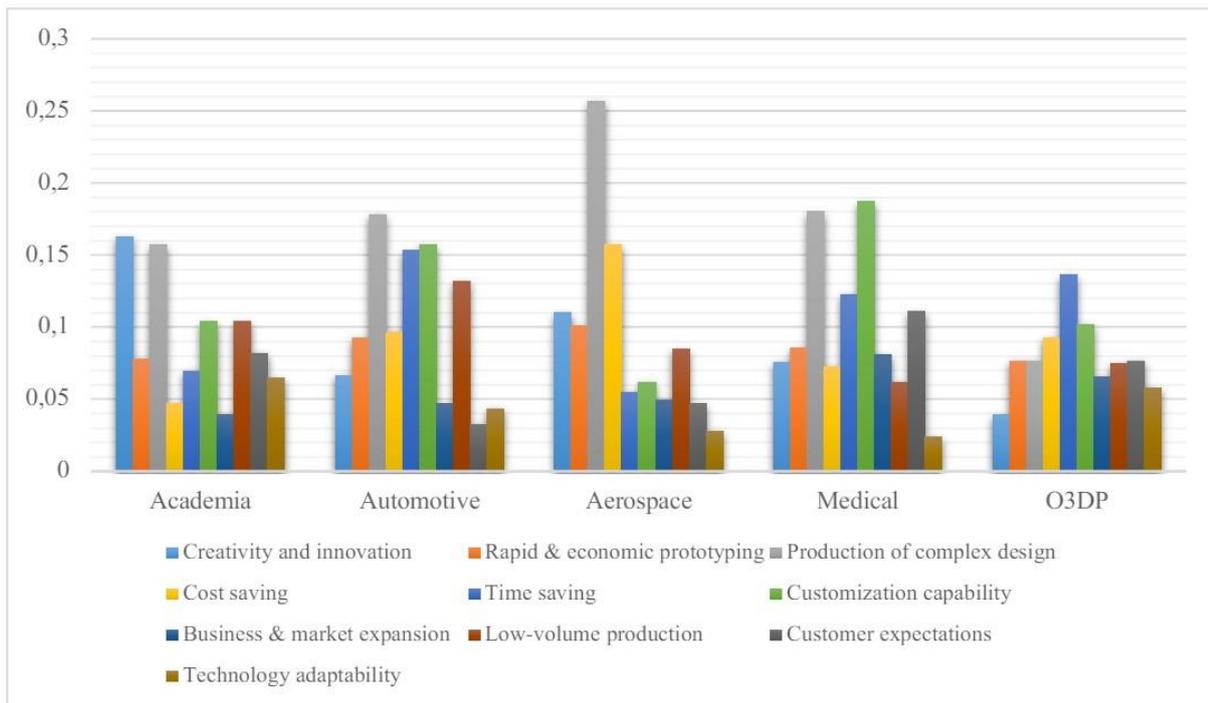


Figura 30: grafico su sondaggio aspettative tecnologia AM per settori

Dalla ricerca si nota come per quanto riguarda un settore come quello aerospace l'AM viene considerata un'enorme opportunità per produrre parti complesse, mentre invece per quello che è il settore medicale l'AM offre un grande vantaggio per la sua grande

capacità di offrire personalizzazione al prodotto senza costi aggiuntivi: per quanto riguarda il settore automotive, le caratteristiche dell'AM più apprezzate sono la possibilità di risparmiare tempo e nell'avere una low-volume production.

## Settore medico

Un caso studio interessante su una possibile applicazione della tecnologia AM in ambito medico è stato realizzato da Verboeket nel 2021, partendo dall'analisi di una situazione reale presente in Olanda. Sono stati presi in considerazione otto diversi centri medici in Olanda dove vengono svolti interventi chirurgici impiegando una guida chirurgica realizzata con AM, che permette di facilitare le operazioni pre e post-operatorie, permettendo un risparmio di 1 ora sull'intera durata dell'intervento.



*Figura 31: guida chirurgica realizzata con SLS*

Queste guide vengono realizzate con tecnologia AM, poiché questi prodotti richiedono delle geometrie molto complesse e un alto grado di personalizzazione dello stesso, qualità garantite dalla tecnologia AM. Il caso in esame analizza due scenari differenti per questa situazione: uno centralizzato dove i centri inviano il file a un centro di AM service per essere prodotto e uno localizzato dove sono i centri stessi a produrre i pezzi.

Inoltre, vengono esplorati all'interno di questi scenari diversi scenari relativi all'impiego di macchine diverse che operano con tecnologia SLS PBF ( situazione attuale con EOS P100 SLS, Formlabs Fuse One e Formlabs Fuse one con caratteristiche ipotetiche). Le misure di performance che vengono investigate sono la responsiveness della SC all'interno di questi scenari e il costo lungo la SC per unità prodotta. Dallo studio emerge come la responsiveness della struttura localizzata sia migliore per gli scenari localizzati ( 53 h vs 26 h per gli scenari con macchine reali) e decisamente migliore nel caso di una macchina ipotetica ( 35 h vs 7 h); si osserva come gran parte del tempo impiegato nella struttura localizzata è il tempo dedicato al cooling che verrebbe abbattuto nel caso di un utilizzo di una macchina con migliori prestazioni, mentre invece il tempo più alto di responsiveness della struttura centralizzata è condizionata dal tempo di trasporto che rimane costante all'interno dei diversi scenari di macchine utilizzate ( 20 h circa). Come costi della SC, viene evidenziato come la situazione si ribalti con la struttura centralizzata che si dimostra nettamente più vantaggiosa in tutti gli scenari esplorati (26,6 euro/unità per la struttura centralizzata nel peggior scenario, 33,3 euro/unità per la struttura localizzata nel suo miglior scenario); i costi che impattano maggiormente questa differenza sono il maggior costo del personale nella struttura localizzata, il maggior investimento in spazio che si deve operare all'interno degli ospedali che ha un costo maggiore rispetto a un AM service e il maggior investimento in macchine AM per la struttura centralizzata.

Nello studio si valutano anche diversi scenari di domanda ( si passa da 2400 a 59250 unità nell'orizzonte di 5 anni), dove emerge come in una struttura localizzata all'aumentare della domanda la responsiveness del sistema rimane invariata e si ammortizzano meglio i costi dell'utilizzo delle macchine, facendo arrivare il costo per unità a livelli simili a quello della struttura centralizzata che invece subisce un peggioramento della sua responsiveness di circa il 15%. Dallo studio non si può definire con esattezza quale possa essere la configurazione migliore a priori; molto dipende in quale situazione tecnologica ci troviamo e quali sono le priorità all'interno della catena logistica. Visto che si sta analizzando un caso studio riguardante prodotti

per il settore medicale, va rimarcato come durante il periodo del Covid numerosi prodotti siano stati realizzati con l'impiego di tecnologie AM come nel caso studio sopra citato. In quel periodo, si è cercato di implementare una struttura AM localizzata, per evitare le disruption causate da interruzioni di produzioni centrali o da interruzioni di trasporto: si è preferito privilegiare la responsiveness della SC, necessaria per alcuni di questi prodotti salvavita, pagando il costo più elevato dato dalla SC localizzata.

Dallo studio emerge, come già evidenziato nel capitolo IV, che l'evoluzione tecnologica delle macchine AM (minore dispersione di polvere, maggiore automatizzazione nella fase di post-processo con conseguente diminuzione del personale impiegato) permetterà sempre di più di far avvicinare a livello di costi per unità una tipologia di SC localizzata a una centralizzata. Un aspetto dello studio è quello di essere stato realizzato in un paese di dimensioni e distanze contenute come l'Olanda: per questo motivo all'interno dello studio si ipotizza di implementare la stessa struttura a livello europeo con città raggiungibili in 24h. Dalle simulazioni si nota come la responsiveness del sistema rimanga uguale per le due strutture e che aumentino in modo significativo i costi della SC centralizzata (+53%), rimanendo a livello di costo per unità ancora quella più vantaggiosa; si può però pensare che in una situazione geografica diversa con distanze più ampie (es. Stati Uniti, Cina) la struttura SC localizzata tenderà ad avvicinarsi sempre di più a livello di costi rispetto a una struttura SC centralizzata, anche se sia in questo caso che nel caso studio di Khajavi manca un'analisi sul costo di trasporto delle materie prime verso queste località che viene ipotizzato il medesimo sia che la struttura sia centralizzata, sia nel caso in cui la struttura sia localizzata.

Il modello illustrato da Verboeket riguardante il settore medico presenta un modello di business e di divisione delle varie fasi ben definito: gli attori che fanno parte di questa struttura sono gli AM service provider, gli ospedali e i clienti finali. Agli AM service provider è assegnato il compito di produzione e stampaggio del prodotto finito e delle operazioni di pre e post-processo, agli ospedali è assegnato in una prima fase il compito di segmentazione, modellazione 3d, sterilizzazione del prodotto e creazione del

database del paziente e in una seconda fase l'installazione dell'impianto nel reparto di chirurgia dell'ospedale con il paziente che in questa struttura è solamente il cliente finale dell'intera catena. Verboeket illustra anche una seconda struttura di business già presente dove al posto degli AM service, ci sono come attori università legate alle strutture ospedaliere che si occupano direttamente loro della modellazione 3D e della produzione, lasciando agli ospedali in questo caso la fase di post- processo.

Ci sono diversi lavori che analizzano come si possano cambiare in futuro questi paradigmi di struttura e i ruoli assegnati ai vari attori in un settore in continua evoluzione, con differenti modelli anche a seconda dello stato preso in considerazione (Salmi, 2022). Un possibile scenario per i paesi con una forte presenza di sanità pubblica è la centralizzazione delle operazioni all'interno dell'ospedale, senza rivolgersi a un AM service provider esterno, dedicandosi non solo alla modellazione 3D e all'installazione dell'impianto, ma anche alla produzione dell'impianto stesso con conseguente gestione della fase di procurement dell'equipaggiamento e delle materie prime. Nei paesi dove invece è più sviluppata una struttura privata che non ha le dimensioni o le sinergie delle strutture pubbliche, le operazioni di modelling, disegno, produzione possono essere affidate a una società terza che può essere un'azienda produttrice di stampanti 3D o una compagnia medica: alla struttura privata rimarrebbe in gestione l'installazione dell'impianto e la raccolta del feedback da parte del paziente, che in questo modello rimane ancora solamente il cliente finale dell'intera catena. Ballardini e Salmi (Ballardini, 2022), (Salmi 2023) propongono per il futuro del settore medicale un interessante modello di business dove un paziente con le competenze adeguate può disegnarsi lui stesso da casa il proprio impianto da installare, creandosi così anche un database personale: il disegno verrebbe poi inviato a un 3d printing service, per poi essere installato dalla struttura ospedaliera.

Nella proposta di questo modello di business rimangono dubbi e limiti su due questioni in particolare: la prima è quella legata ai diritti della proprietà intellettuale riguardante il disegno degli impianti e la seconda è inerente alla possibilità degli ospedali di accettare di installare un impianto disegnato non da un professionista della materia.

L'ultimo modello di business proposto è denominato “*Digital medical service model*”, dove il paziente si interfaccia direttamente con una piattaforma digitale per la fase di registrazione, inserimento dei propri dati e dei propri bisogni inviando tutte le informazioni agli altri due attori della catena, che costantemente possono monitorare i suoi dati e l'aggiornamento di essi. Questo servizio di interconnessione tra gli attori permetterebbe di eliminare le inefficienze in termini di tempo e corretto inserimento dei dati che spesso si verificano a livello organizzativo nella fase di caricamento dei dati presso la struttura ospedaliera; inoltre, la presenza di un database condiviso tra produttore, paziente e ospedale permetterebbe una più accurata diagnosi del problema, garantendo una corretta personalizzazione del prodotto (Salmi, 2023).

La sfida del Covid-19 è stata un momento significativo nell'affermazione della tecnologia AM, non solo in ambito medico, ma in generale in ambito industriale mostrando le potenzialità di questa tecnologia non esclusivamente come risposta a una situazione d'emergenza, ma come vera e propria alternativa per la produzione di massa di alcuni prodotti specifici. Un caso interessante è quello della produzione di tamponi nasali avvenuta nell'aprile 2020. L'azienda di produzione di stampanti 3D Formlabs ha progettato e messo a punto in collaborazione con le istituzioni sanitarie americane la produzione di questi tamponi nasali, la cui disponibilità era limitata all'epoca; grazie all'impiego della stereolitografia e anche alle dimensioni contenute del prodotto, le stampanti 3D sono arrivate a produrre i tamponi con un tasso di 640 pezzi/giorno. Formlabs ha destinato 250 stampanti per la produzione di questi elementi, garantendo così una produzione giornaliera per il territorio americano di circa 160mila tamponi nasali al giorno. Grazie alla natura digitale della tecnologia AM descritta nei capitoli precedenti, questa soluzione è stata velocemente implementata anche sul suolo europeo.

Un passaggio chiave nell'ambito medico, inerente alla produzione con stampa 3D, è la certificazione dei prodotti da parte dell'autorità competenti: solitamente la sterilizzazione in ambito medico dei prodotti viene realizzata in autoclave, ma non tutti i materiali utilizzati resistono alle alte temperature e alle alte pressioni dell'autoclave.

Nel caso citato precedentemente, la resina utilizzata è una resina biocompatibile e autoclavabile, ma per quanto riguarda altri prodotti realizzati per l'emergenza da Covid-19 non è stato possibile utilizzare lo stesso sistema. Un caso riguarda le maschere facciali realizzate con il polimero PLActive che si presenta come un polimero biocompatibile, ma che non può essere sottoposto a sterilizzazione in autoclave; la scelta che si è fatta in questo caso è l'impiego di un disinfettante chimico, da usare molto frequentemente poiché la porosità dei materiali polimerici impiegati facilita la possibile crescita di batteri se i prodotti non sono sufficientemente sterilizzati. Si evince come si presentino in questo ambito numerose possibilità a livello di scelta di materiali da impiegare, ma che sia necessario conoscere attentamente le proprietà di ciascuno di essi per modellare un processo che sia efficace sia dal punto di vista produttivo ed economico, ma anche rispettoso delle norme sanitarie vigenti.

Un interessante esempio di come diminuisce la complessità della SC a livello medico, si ha da un caso studio del 2017 (Ozceylan et al.,2017), dove viene analizzata la differenza di SC per quanto riguarda la produzione di soles ortopediche personalizzate. Si può osservare nelle due figure riportate qua sotto come la SC subisca una semplificazione già dalla fase di procurement con la necessità nel secondo caso di dover ordinare solamente il filamento di nylon.

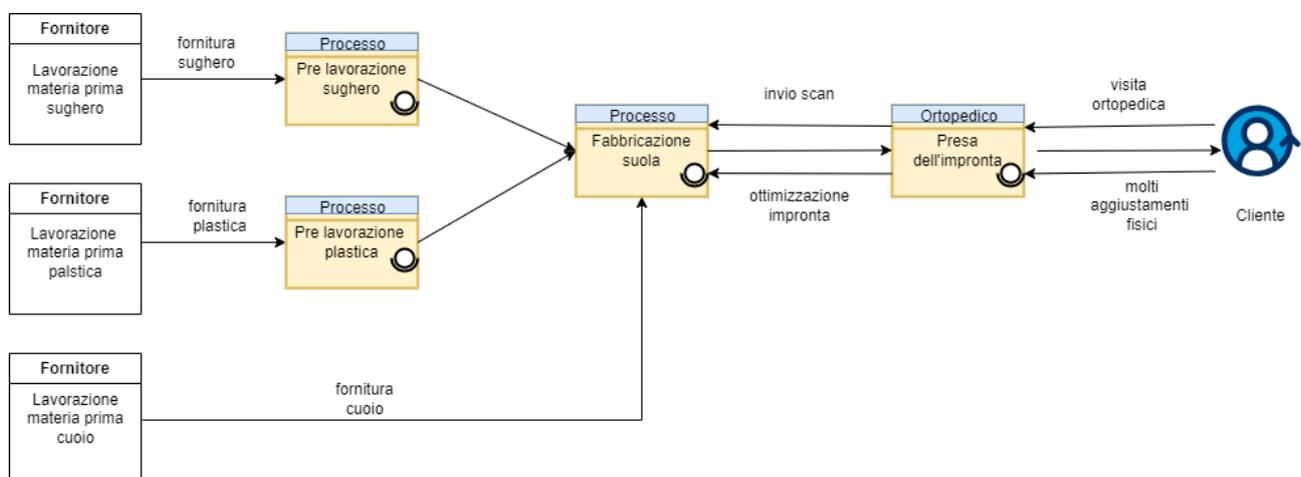


Figura 32: SC tradizionale per suola ortopedica

In questa situazione, l'AM porta un grande vantaggio nella fase di personalizzazione del prodotto poiché attraverso lo scan 3D è necessario una sola rilevazione per ottenere un prodotto adatto e pronto per l'utente finale: nel caso delle metodologie tradizionali con l'impiego dell'impronta manuale, spesso bisogna ricorrere a numerose fasi di adattamento con accorgimenti oppure in alcuni casi andando a rifare completamente il prodotto, con ulteriori ritardi nei tempi di consegna.

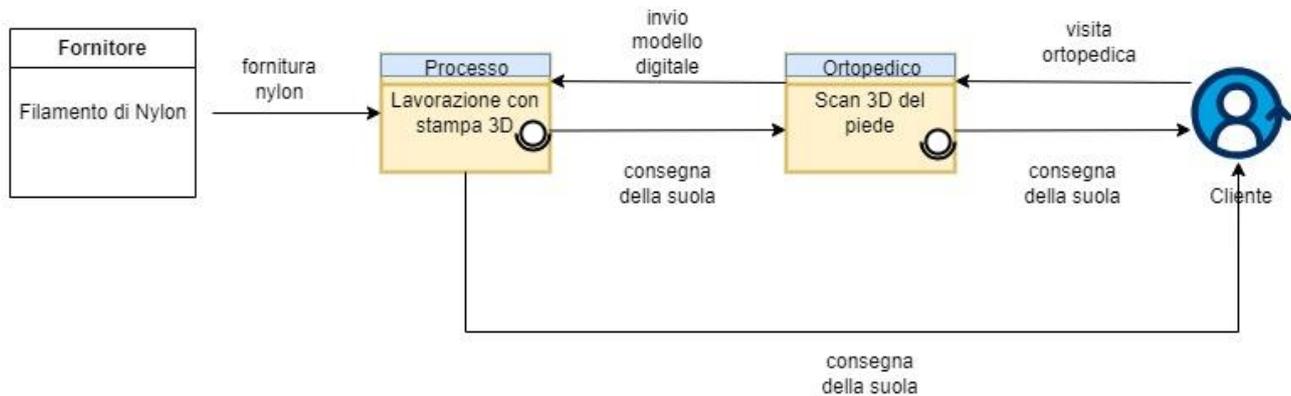


Figura 33: SC con AM per suola ortopedica

A livello di dati ottenuti sui lead time dei due sistemi, si è notato come nel primo caso il cliente attende circa 20 giorni mediamente per la consegna della suola; dato che può arrivare a 27 giorni nel caso in cui il primo test non vada a buon fine; nel caso con tecnologia AM il lead time medio di consegna è mediamente 2,5 giorni e in questa situazione non si hanno ulteriori prove di calzatura, poiché lo scan 3D garantisce una maggiore accuratezza nella realizzazione del prodotto. Un caso studio simile realizzato da Verboeket nel 2024 (Verboeket et al, 2024) analizza quelli che sono i costi totali di SC per la produzione e trasporto di questo tipo di soluzione: con la tecnologia attuale e i costi di produzione attuali il costo di SC per unità rimane superiore per la tecnologia AM (1024€ vs 908€). Il lavoro prospetta che nel 2030 si arriverà ad avere un minor costo con tecnologia con tecnologia AM, analizzando l'evoluzione tecnologica prevista delle macchine AM con conseguente diminuzione dei costi. Si può pertanto evidenziare come le caratteristiche generale dell'AM presentate nel capitolo precedente, come la facilità di personalizzazione e disegno di differenti catene logistiche grazie alla natura

digitale dell'AM, riescano e possano garantire nel futuro in ambito medico diversi modelli di business e differenti possibilità di strutturare la propria catena di operazioni, a seconda del contesto in cui ci si trova e dei valori di performance che si vogliono massimizzare. Inoltre, è possibile prospettare un'implementazione ordinaria all'interno del settore medico per quanto riguarda l'AM e non solamente di utilizzo nei casi emergenziali e nella fabbricazione di prodotti salvavita come avvenuto nel caso della pandemia da Covid 19.

### **Settore automotive**

Un altro importante settore di applicazione della tecnologia AM è il settore automotive che è stato uno dei primi comparti industriali ad utilizzare l'Additive Manufacturing, inizialmente per la produzione di prototipi e poi successivamente per la produzione di componenti di piccole medie-dimensioni all'interno del veicolo. Un esempio interessante di applicazione dell'AM nel settore automotive è per la costruzione di modelli scala 1:1 di monoposto da corsa per i test in galleria del vento (Zanoni et al., 2018); per un'azienda che opera in un contesto così altamente competitivo, la velocità nel testare e deliberare un nuovo componente o nel reagire a un problema avuto in pista diventa un fattore critico di successo per il risultato finale. Proprio per questo motivo, il settore racing ha da subito guardato all'AM come un'opportunità per migliorare il time to market del prodotto e anche per la possibilità di riuscire a costruire un prototipo con caratteristiche tecniche molto simili a quelle del prodotto finito; un vantaggio che ha favorito lo sviluppo dell'AM in questo settore è la grande quantità di denaro investito dalle strutture racing per la ricerca e lo sviluppo volta al miglioramento della performance.



*Figura 34: immagine di un prototipo realizzato con tecnologia AM*

Il caso studio citato (Zanoni et al, 2018) prende in considerazione un'azienda di monoposto con sede in Italia per evidenziare le differenze tra la produzione di un prototipo con tecnologia tradizionale (CNC e stampaggio iniezione) e quella con tecnologia AM (SLA); viene scelta la SLA perché è la tecnologia AM che permette di raggiungere i livelli di dettaglio degli strati desiderati (12-30 micrometri). In uno scenario di tecnologia tradizionale, il lead time di produzione del prototipo è di circa 8 settimane: ogni prototipo ha circa 100 componenti e il costo totale per la tecnologia tradizionale della produzione dell'intero veicolo è di 10000 euro. Per quanto riguarda la tecnologia AM, il lead time di produzione si riduce significativamente (1-2 settimane) così come il costo del prototipo (3500 euro). In questo caso si evidenzia come l'AM abbia un impatto positivo sulla SC del prodotto in termini sia di responsiveness che in termini di costi, non nella fase di gestione di magazzino o di trasporto finale della merce come in altre situazioni, ma nella fase di design del prodotto e di pre-produzione dello stesso. Una big company nel settore automotive come Ford ha deciso di utilizzare la prototipazione con AM, non per la realizzazione del prototipo dell'intero mezzo ma per la prototipazione di specifici componenti del motore (collettori, teste cilindriche) che necessitavano con tecnologie tradizionali di ingenti investimenti in design con la creazione di utensili e stampi appositi per la fase di prototipazione del componente (Dr. C. Dhandapani, G. Vanishree, 2022).

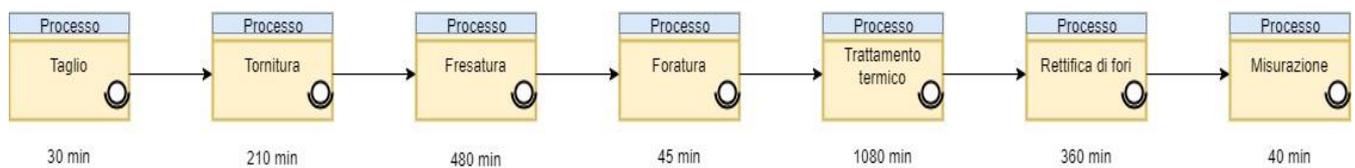
Un'altra applicazione che ha trovato l'AM all'interno dell'industria automotive è per la produzione di utensili, fondamentali per garantire un assemblaggio qualitativo dei componenti finali. BMW ha realizzato utensili con tecnologia additive personalizzati (72% più leggeri) per garantire una migliore ergonomica all'operatore; secondo i dati pubblicati da BMW, l'impiego di questi utensili ha garantito un risparmio a livello di costi del 52% e una riduzione del tempo di progetto del 98%. L'AM nel settore automotive ha iniziato un percorso di studio e ricerca da parte dei reparti di R&D nel corso degli anni anche per la produzione di componenti e prodotti finiti installati sulle autovetture; si tratta di componenti con geometrie complesse, che avrebbero tempi di produzione più lunghi e costosi con le tecnologie tradizionali. Al momento le parti prodotte con tecnologia AM sono rivestimenti esterni ( paraurti e frangivento, prodotti con SLS utilizzando materiali polimerici), pompe e valvole per lo scorrimento fluidi (prodotti con SLS o EBM, utilizzando leghe di alluminio) e canali di raffreddamento (prodotti con SLS, utilizzando leghe di alluminio): queste parti sono però destinate alla produzione di hypercar o di ricostruzione di macchine d'epoca dove i volumi di produzione sono decisamente inferiori rispetto alla produzione di un'automobile di serie. Le possibili applicazioni future sul prodotto finito riguardano la produzione di componenti finiti del motore, coprimozzi, molle di sospensione, dashboard interne e sensori. Uno dei limiti riguardanti la produzione finale di prodotti AM è la mancanza di possibilità di realizzare prodotti di grandi dimensioni; per questo motivo una possibile soluzione è che i componenti con dimensioni maggiori vengono progettati come modulari, anche se questo richiede un'ulteriore fase di assemblaggio (Sarvankar et al, 2019). La possibile riduzione della presenza di componenti e la realizzazione di pezzi integrati con tecnologia AM per la costruzione del prodotto finito può essere un vantaggio per minimizzare le disruption all'interno delle SC del settore automotive; infatti, le SC del settore automotive si configurano come tra le più complesse e più soggette a disruption a causa del gran numero di componenti da far arrivare (Uffhausen, 2020). L'utilizzo dell'AM potrebbe portare a una diminuzione della dipendenza delle aziende automotive dai fornitori di prodotti critici, che può diventare problematica nel

caso di eventi che interrompono la catena di fornitura, come nel caso del Covid 19: è stato stimato da Dan e Bradstreet ( Dan&Bradstrett, 2020) che nel 2020 nella disruption nella regione di Wuhan siano state coinvolte 51,000 global companies con fornitori diretti (1st tier) e circa 5 milioni di companies con 2nd tier nella stessa regione. I fattori che rallentano questa transizione sono la mancanza di fornitori di materie prime per la realizzazione di prodotti finiti AM (Uffhausen, 2020), la difficoltà nel cambiare il proprio sistema di procurement e nel ridisegnare il proprio sistema di produzione dei componenti e di assemblaggio all'interno dello stabilimento (Pellengahr et al. 2018).

Un altro motivo che potrebbe rafforzare questa scelta sarebbe la possibilità di avere una maggiore competizione sul mercato e sui servizi post-vendita. Spesso i rivenditori di ricambi, per evitare alti costi di gestione del magazzino, tengono nel loro inventario solamente i pezzi di ricambio più utilizzati, facendo arrivare quando necessario da magazzini di consolidamento comuni i ricambi più costosi o con domande minore. L'AM potrebbe portare a un cambiamento di questa situazione permettendo la produzione on-demand di questi prodotti e garantendo un risparmio significativo in termini di gestione del magazzino. Al momento non c'è ancora uno sviluppo significativo di questa tecnologia di business, poiché sono ancora alti gli investimenti in macchine e non vi è sufficiente domanda di ricambi per garantire una profittabilità economica( Ribeiro et al,2020). La profittabilità economica dei ricambi nel settore automotive è stata esplorata in un caso studio da Ashell (Ashell et al, 2019) in cui sono stati calcolati vari costi di SC tra una tecnologia tradizionale e varie tipologie di tecnologie AM. Il lavoro esplora diversi scenari di realizzazione (impiego di materiale polimerico per la realizzazione con tecnologia FDM e SLS, impiego di polvere metallica SLM) evidenziando come al momento un vantaggio nei costi ci sia solamente con l'impiego della FDM (-11% per la diminuzione dei costi di magazzino); al contrario un impiego della SLS provoca un aumento dei costi del 38% sulla catena, nonostante una diminuzione dei costi dal punto di vista del trasporto e dei costi di magazzino, per i costi elevati di produzione. La SLM è stata subito esclusa come possibile soluzione, poiché al momento i costi di produzione sono troppo più elevati

rispetto a una tecnologia tradizionale per pensare a una sua possibile profittabilità economica. Anche in questo caso, l'utilizzo della tecnologia AM garantisce le caratteristiche citate precedentemente, ovvero diminuzione dei costi di magazzino e lead time minore all'interno della catena.

Un caso studio interessante per valutare i cambiamenti all'interno della SC di produzione del settore automotive è inerente alla realizzazione di utensili ( mandrini) per essere impiegati nella linea di uno stabilimento automotive in Svezia.



*Figura 35: SC produzione di un utensile del settore automotive con tecnologia tradizionale*

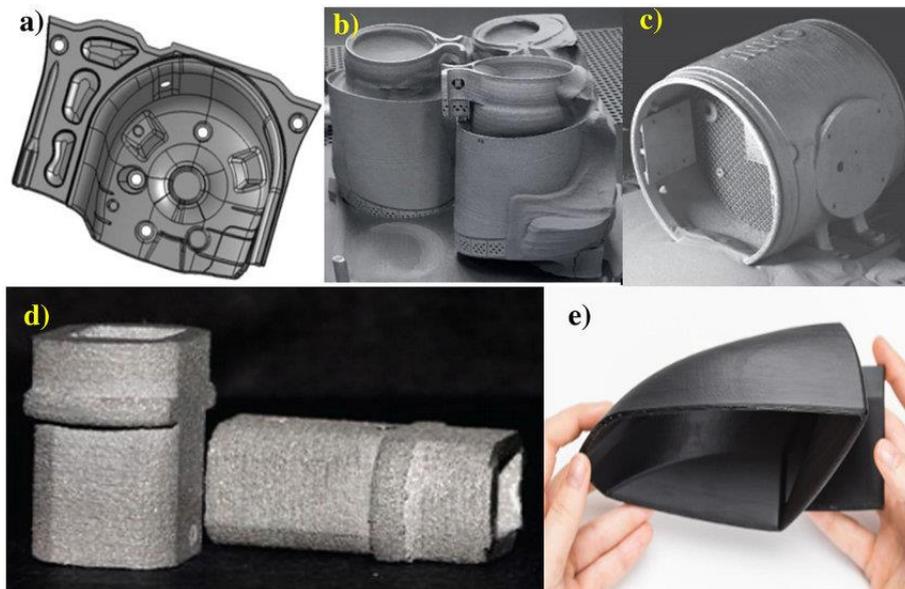


*Figura 36: SC produzione di un utensile del settore automotive con tecnologia AM*

Considerando anche le code nelle varie stazioni di produzioni, le simulazioni hanno evidenziato un lead time di produzione per la tecnologia tradizionale di 219h, mentre si riduce a 116h per una tecnologia AM: la presenza di più fasi come nel caso aerospace (figura 38-39) per quanto riguarda la tecnologia tradizionale rende più lento l'attraversamento del sistema e la sincronizzazione delle fasi, con conseguente aumento delle code. Come nel caso del prototipo citato precedentemente, il lead time di produzione del componente diventa inferiore con l'impiego dell'AM, garantendo una miglior efficienza e responsiveness all'interno della catena produttiva.

Un'opportunità per le aziende automotive derivante dall'introduzione delle tecnologie AM è la possibilità di alleggerire i veicoli, grazie all'utilizzo di componenti finali AM;

infatti, grazie alla possibilità di disegnare geometrie complesse, i componenti finali AM possono presentare strutture particolari (esempio struttura a lattice) che diminuisce notevolmente il peso del prodotto finito, senza compromettere le caratteristiche di resistenza di esso. L'aspetto della diminuzione del peso dei veicoli, con conseguente riduzione del consumo di carburante sta diventando e sarà nei prossimi anni uno dei fattori critici di successo per le aziende automotive, poiché viene percepito dai clienti come valore aggiunto al momento dell'acquisto; si prospetta quindi un aumento della ricerca in questo ambito seguendo l'esempio già avvenuto nel settore aeronautico (Dr. C. Dhandapani, G. Vanishree, 2022).



*Figura 37: componenti del settore automotive realizzati con AM*

Al momento il settore automotive non è quindi ancora riuscito ad implementare una produzione in serie di componenti AM sui propri veicoli per due ragioni:

- Difficoltà nel definire degli standard di qualità per quanto riguarda i prodotti finiti
- Difficoltà a raggiungere i tassi di produzione necessari richiesti dal settore con una tecnologia AM che al momento presenta tassi di produzione troppo bassi.

Le applicazioni della tecnologia AM sono principalmente nell'area di prototyping e di tooling, che permettono comunque già un significativo risparmio in termini di tempi e

di costi, aspetti d'interesse per le aziende che lavorano nel settore automotive. Le aspettative future, dati anche gli investimenti importanti realizzati da alcune aziende del settore sulla ricerca AM (Audi, Volvo, BMW) sono che inizino a diffondersi maggiormente prima i ricambi realizzati con tecnologia AM e poi i prodotti finiti: al momento i ricambi e prodotti finiti prodotti con AM sono utilizzati quasi totalmente per il rifacimento di auto d'epoca o per la produzione di hypercar.

## **Settore aerospace**

Il settore aerospace come quello automotive ha osservato e sfruttato da subito la possibilità di introdurre parti e componenti finali utilizzando la tecnologia AM, con l'intento di avere componenti finali più leggeri, con più parti integrati in un unico componente e con una SC del prodotto meno complessa. Un esempio interessante di questo intento è presentato in un lavoro di Khajavi (Khajavi et al. 2020) dove si analizza la produzione degli ugelli degli iniettori di carburante da parte di GE per la costruzione dei motori LEAP jet. Ogni motore ha 19 ugelli e la produzione con tecnologia tradizionale prevedeva la realizzazione di questi ugelli assemblando 20 componenti.

Nella figura 38 è rappresentata la SC convenzionale con ogni componente che deve subire processo di fusione, lavorazione, formatura e finitura per poi essere depositato nei rispettivi inventory, prima di essere assemblato e saldato con gli altri per la realizzazione del prodotto finito.

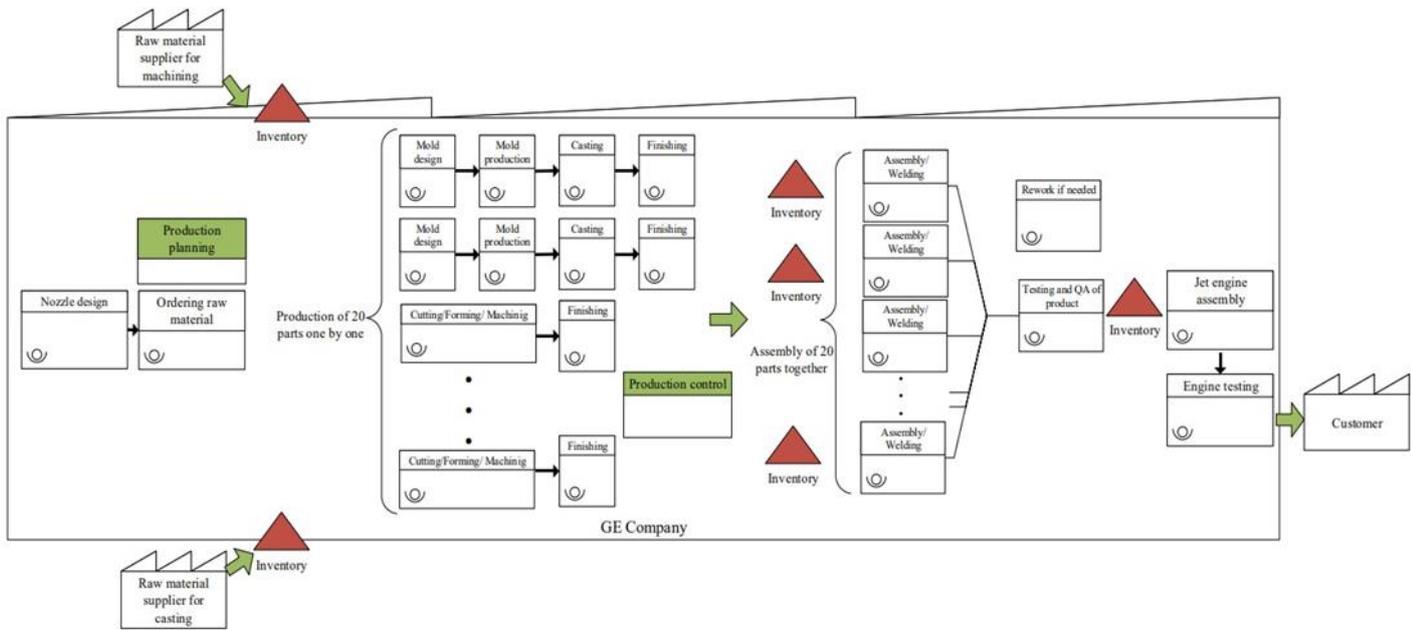


Figura 38: SC per la produzione convenzionale degli ugelli degli iniettori di carburante (Khajavi)

Si nota in figura 39, come cambia la SC per la realizzazione degli ugelli: il magazzino delle materie prime rimane ( in questo caso per la polvere di metallo), ma vengono eliminati gli inventory work-in-progress e tutte le fasi di lavorazione e di assemblaggio che richiedono inoltre una perfetta sincronizzazione per evitare ritardi all'interno della catena produttiva.

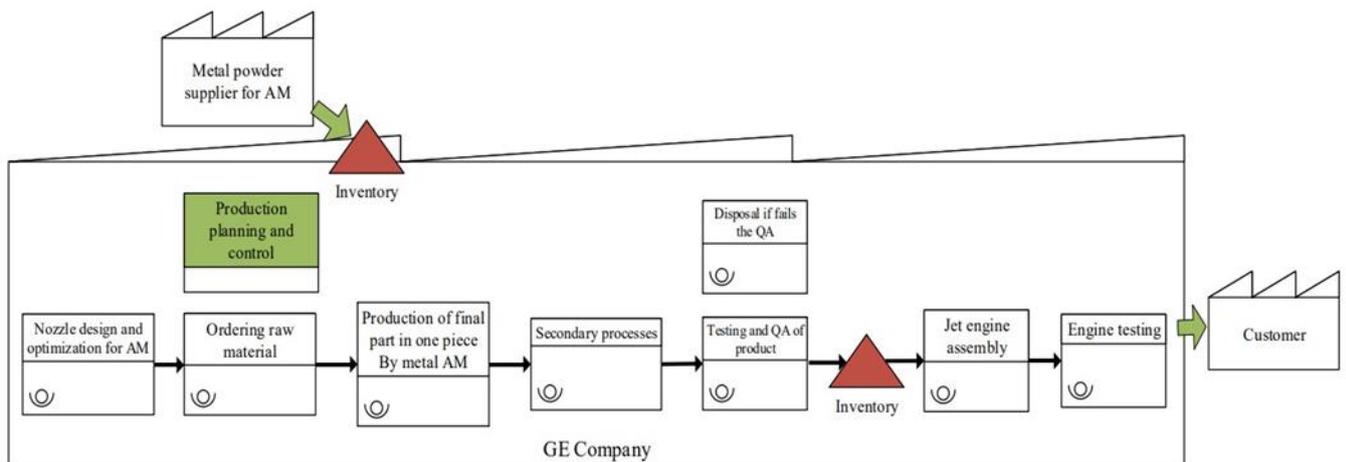


Figura 39: SC per la produzione con tecnologia AM degli ugelli degli iniettori di carburante

Khajavi prendendo spunto da un lavoro di Serderasan utilizza nel suo studio un indice per valutare la complessità della SC:

$$SCCI = SKUs \times Markets\ served \times Countries\ served \times Manufacturing\ Processes \times \\ (Inventories + Factories + Customers + Employees) / Sales\ revenue$$

Questo indice mette in relazione la complessità della SC con il numero di SKUs prodotti, numero di distinti mercati serviti, numero di paesi serviti, numero di distinti processi manifatturieri durante il processo e con le sommatorie di siti produttivi, magazzini, clienti e impiegati presenti all'interno della SC rappresentate precedentemente.

Questo valore viene quindi calcolato per le due tipologie di configurazione e messo a confronto da Khajavi con un altro indice chiamato SCCR, sotto riportato, in cui si mettono a confronto l'SCCI calcolato precedentemente di una SC con CM e di una SC con AM:

$$SCCR = (SCCI\ of\ CM) / (SCCI\ of\ AM)$$

$$SCCR = (24 \times Markets\ served_{CM} \times Countries\ served_{CM} \times 7 \times (3 + 23 + Customers_{CM} + \\ Employees_{CM}) / Sales\ revenue_{CM}) / (3 \times Markets\ served_{AM} \times Countries\ served_{AM} \times 3 \times \\ (2 + 2 + Customers_{AM} + Employees_{AM}) / Sales\ revenue_{AM})$$

*Formula: utilizzata (Khajavi,2020) per il calcolo della SCCR*

Un valore maggiore di 1 del SCCR indica una semplificazione della SC con AM, mentre un valore minore di 1 mostra un peggioramento della complessità della SC con l'introduzione della tecnologia AM. Ipotizzando le stesse sales revenue per entrambe le tipologie di produzione e lo stesso numero di *customers* e *employees*, Khajavi ha ottenuto come risultato un SCCR maggiore di 1, dimostrando come l'introduzione dell'AM possa portare a una semplificazione della complessità della SC nel settore aerospace; il limite di questo studio di Khajavi rispetto ad altri suoi lavori citati nel capitolo 4 ( ricambi AM nel settore aerospace) è la mancanza di una quantificazione economica dei vantaggi guadagnati da questa diminuzione della complessità della catena. Un lavoro di Heppa del 2018 (Heppa, 2018) ha stimato il lead time di produzione degli ugelli realizzati da GE con tecnologia tradizionale e con tecnologia additive ( dalle fasi di pre-lavorazione alla fase di assemblaggio): circa 14 giorni per

quanto riguarda la tecnologia tradizionale, con una riduzione a 7 giorni per lo scenario con fabbricazione additiva. Nel 2018 la produzione di questo tipo di componenti era stata incrementata da parte di GE da 25000 parti a 40000 parti all'anno, arrivando nel 2020 a una produzione di circa 100 000 componenti annui. Non è questo l'unico caso di diminuzione della complessità di un prodotto finito per quanto riguarda il settore dell'aerospazio: la Nasa utilizza per il motore del razzo J-2X un ugello AM realizzato con una polvere di nichel cromo.



*Figura 40: ugello realizzato per motore Nasa*

La complessità del pezzo con tecnologia tradizionale richiedeva l'assemblaggio di 120 componenti, mentre con l'impiego di tecnologia AM si utilizzano solo 2 componenti che vengono assemblati in un unico legame, garantendo una struttura più resistente e più affidabile per l'intero veicolo, oltre che come nel caso precedente una diminuzione della complessità della SC con diminuzione dell'inventario e del numero dei processi da effettuare. A livello di lead time come già osservato precedentemente nel settore automotive, la riduzione è significativa con un lead time di 1 mese per la produzione AM, rispetto all'anno impiegato con una tecnologia tradizionale (Wimpenny et al. 2017). Un altro esempio di applicazione è quella di Airbus che ha scelto di utilizzare la tecnologia AM (tecnologia laser con polvere di titanio) per la produzione dei connettori per cabine, impiegati nella realizzazione dell'Airbus A350 XWB. Precedentemente per la produzione di questo componente veniva utilizzata una lega di alluminio, fresata, con una produzione di scarti del 95%; con la tecnologia AM la percentuale di scarti si riduce al 5%, con un lead time di produzione di 1 mese contro i

6 mesi precedenti e con un pezzo finale come nel caso della Nasa, con proprietà e caratteristiche migliori per la sicurezza del veicolo ( 20 KN di forza anteriore e resistenza fino ai 330°C ) (sito Airbus).

I principali materiali impiegati nell'industria aerospace sono leghe a base di nichel e titanio, utilizzati per le capacità di questi materiali di avere ottime proprietà meccaniche ed essere resistenti ad alte temperature; un'applicazione per la produzione di massa utilizzando le leghe in titanio sono le pale delle turbine per gli aircraft commerciali (sito GE). Parte dell'analisi sui ricambi per quanto riguarda il settore aerospace è già stata affrontata nel capitolo 4 con i casi studio di Khajavi e Liu, dove è emerso come una SC centralizzata AM possa essere in molti scenari leggermente più favorevole economicamente rispetto a una SC decentralizzata AM, la quale però permette di avere dei migliori livelli d'inventario e come visto negli esempi precedenti un lead time minore (maggiore responsiveness) e una minore complessità (minore rischio di disruption all'interno della catena).

La tecnologia AM per la produzione di ricambi si configura meglio rispetto a una tecnologia convenzionale nel settore aerospace poiché spesso i ricambi hanno una bassa domanda e le tecnologie convenzionali non sono in grado di produrre un singolo pezzo (Knofius et al. 2016). L'AM può essere utilizzata anche per la riparazione di elementi dell'aeromobile, senza dover ricorrere alla sostituzione dell'intero pezzo, come nel caso della punta del bruciatore nelle turbine a gas (Kalender et al. 2019). L'impiego per questi scopi è stato preso in considerazione anche dall'industria militare per la riparazione dei propri velivoli militari: l'utilizzo di una tecnologia AM rispetto alla fresatura ha portato alla realizzazione del ricambio in un tempo di 2 giorni con un costo di 412\$ invece che 45 giorni con un costo 2000\$. In questi casi la tecnologia impiegata è la DED, che permette una significativa facilità d'uso e un significativo risparmio in termini di costi per la riparazione di errori geometrici; altre tecnologie AM come la LMD vengono impiegate per mantenere l'integrità della struttura del pezzo, con trattamenti che prevengono da future crepe e fenomeni di corrosione.

Un forte impulso e aiuto alla diffusione dell'AM nel settore aerospace potrà arrivare negli anni futuri dalle tecnologie inerenti all'Industria 4.0 di cui l'AM fa parte con tecnologie come IoT, Cloud manufacturing, Big Data, Artificial Intelligence, Block Chain. Il concetto che si desidererebbe implementare è quello di *Smart Factory*, un'azienda digitale ed intelligente dove le macchine dotate di sensori si scambiano le informazioni su processo e performance e creano un sistema di controllo della produzione che potrebbe andare avanti senza intervento umano, monitorando costantemente lo stato del sistema (Selinger et al,2016).

Le varie tecnologie citate possono essere in grado di creare questa situazione: la Block Chain permette di visionare le varie parti del processo, garantendo la trasparenza e la corretta condivisione dei dati lungo tutta la catena (Fisher et al, 2018). L'impiego dei Big Data permette di creare una previsione della domanda per efficientare il processo di produzione anche se mantiene ancora molti limiti nel prevedere una domanda imprevedibile come nel caso dei ricambi prodotti con AM (Majed et al, 2019). Il Cloud Manufacturing permette di migliorare l'efficienza e di implementare una produzione on-demand (Simeone et al,2020). Fondamentale è la diffusione dell'internet of things che permette di avere le macchine interconnesse tra di loro, monitorando costantemente lo svolgimento dei processi e scambiandosi informazioni sullo stato del sistema. Questo aspetto è molto utile, in particolare per prevenire le rotture o anticipare le sostituzioni, evitando gli importanti costi di riparazione e di intervento che si hanno in un settore come quello aerospace: infatti grazie ai sensori si possono individuare le prime rotture o difetti sul pezzo andandolo a sostituire preventivamente oppure a rinforzarlo depositando uno strato di materiale nella parte danneggiata impiegando la tecnologia AM. (Gisario et al,2019).

L'apporto dell'IA con i suoi programmi può sostituire l'uomo nelle decisioni di produzioni, monitoraggio dell'inventario nella produzione di ricambi, dando alla produzione AM un livello di standard elevato come qualità dei processi (Amirkolai et al, 2017).

## Settore energetico

Nel settore energetico si stanno configurando diverse tipologie di applicazioni che vanno ad impattare in modi diversi la SC già esistente; in alcuni casi si tratta di introdurre componenti AM in impianti situati in località remote come nel settore aerospace dove non è possibile tenere un magazzino di ricambi e i trasporti per esso diventano molto onerosi. In altre situazioni la tecnologia AM dovrebbe essere implementata per la realizzazione di pezzi datati (come nel caso dell'auto d'epoca) con cui erano stati realizzati gli impianti. In una intervista Robert Tregoning, membro dell'U.S. Nuclear Regulatory Commission, ha affermato come ci sia la volontà di inserire la tecnologia AM nel settore dei ricambi per l'impiantistica nucleare, poiché molte delle strutture risalgono agli anni '60-'70 e i magazzini di pezzi di ricambio dell'epoca sono diventati obsoleti: *“In questo caso l'AM permette di realizzare il pezzo grazie alla reverse engineering e di realizzarlo nelle quantità richieste, senza creare pile di componenti che rischiano diventare obsoleti. Un altro vantaggio è quella di poter utilizzare materiali resistenti a sollecitazioni ed alte temperature, necessari in un settore come quello dell'impiantistica nucleare. La limitazione all'introduzione di questi ricambi riguarda l'assenza di una standardizzazione precisa sulle caratteristiche dei pezzi che devono avere i più elevati standard di sicurezza”*.

Una delle applicazioni che si possono trovare nel settore energetico per l'industria AM è quella legata alla produzione degli stampi per la realizzazione delle pale per le turbine eoliche: questi stampi sono lunghi 50m e quindi hanno un lead time significativo di produzione per quanto riguarda la tecnologia tradizionale (27 settimane). Sotto sono riportate le varie fasi di processo utilizzando le due diverse tecnologie: con la tecnologia tradizionale, viene realizzata prima una pre-forma con una macchina CNC, dal cui negativo vengono ricavate le due “conchiglie” che unite assieme danno lo stampo finale su cui dovrà essere attaccato successivamente un riscaldatore per la fase successiva di produzione dell'elica.

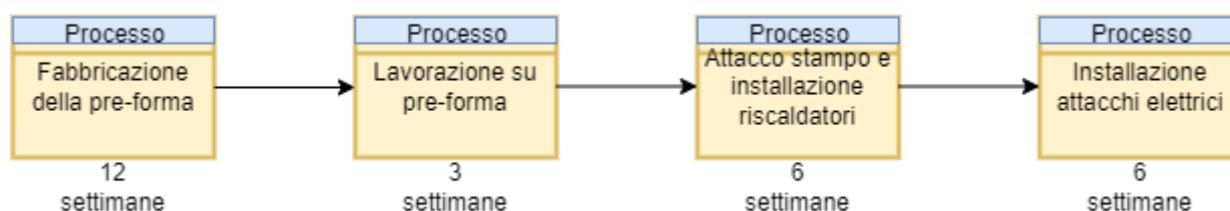


Figura 41: SC tradizionale per forme per eliche

Per la tecnologia AM invece 12 settimane vengono impiegate per la realizzazione già delle due conchiglie dello stampo, per essere poi sottoposte a lavori di finitura e rinforzo con fibra di carbonio: si essere quest'operazione perché è necessario che questi stampi possano essere impiegati per la realizzazione di circa 600 pale, prima di essere poi dismessi. Si nota quindi come già visto nell'esempio legato al settore automotive che l'AM è in grado di diminuire i tempi di time-to-market del prodotto, offrendo anche la possibilità di migliorare le caratteristiche del prodotto stesso, garantendo un ciclo di vita più lungo.



Figura 42: SC con AM per forme per eliche

A livello di costi, questa implementazione si presenta vantaggiosa a livello economico, poiché vi è una significativa riduzione nel costo dello stampo utilizzando la tecnologia AM; se si considera un utilizzo dello stampo per la realizzazione di 500 eliche, il costo dello stampo suddiviso per elica è di 5000 €/ pezzo con tecnologia tradizionale contro 3562 €/ pezzo con tecnologia AM. A livello economico, è una situazione paragonabile a quella del caso studio di Zanoni per la realizzazione di un prototipo dove l'AM permette di avere sia una diminuzione a livello di complessità di realizzazione, sia di lead time e sia di costi.

Spesso nel settore energetico, si ha la problematica di dover intervenire sui prodotti in luoghi remoti con la difficoltà di avere i pezzi in tempo per la riparazione: la soluzione

avuta fino a questo momento con le tecnologie tradizionali è stata quella ove possibile di difendere la propria SC con magazzini di ricambi in loco, oppure inviando on-demand i pezzi ai siti, con il fatto di dover sostenere lunghi lead-time e dover mantenere l'impianto inattivo con conseguente perdite di denaro. L'AM si è presentata come un'opportunità per risolvere questa problematica con la possibilità di portare in loco le stampanti 3D per la produzione di pezzi di ricambio on-demand eliminando di conseguenza la presenza di un magazzino dei ricambi. Una delle prime stampanti realizzate pensando a questa applicazione, è stata realizzata nel 2017 dal Rotterdam Additive Manufacturing Lab: essa consiste in un braccio robotico che combina la tecnologia AM con il CNC, per la produzione di un'elica a 3 pale da 400 kg, realizzata in una lega di alluminio e bronzo. L'installazione di questa stampante è stata poi eseguita nei porti, per operare in modo immediato in caso di problematica a un'elica di una nave e far in modo che la sosta per la riparazione venga ridotto e non ci sia la necessità di avere in ogni porto un costoso magazzino dei ricambi.

Un esempio di azienda che opera nel campo dell'energia e ha migliorato le proprie performance in termini di lead time è quello di Vestas, azienda leader nel settore delle pale eoliche. Precedentemente Vestas dava in gestione a terzi la produzione dei calibri d'ispezione da utilizzare durante i processi di produzione ed installazione delle pale eoliche; è fondamentale la precisione e la rapidità d'intervento, poiché tenere fermo un impianto eolico è molto oneroso dal punto di vista economico. I lead time fino a quel momento variavano dalle 5 alle 12 settimane. Dal 2021 VESTAS ha deciso di produrre questi calibri con tecnologia AM realizzandoli in Onyx, creando una piattaforma digitale cloud sulla quale gli addetti possono accedere ai disegni desiderati e stamparli nella sede in cui vi è necessità: è stata eliminata anche la fase di test di conformità del prodotto, poiché viene utilizzato un software che permette di monitorare in tempo reale la conformità degli utensili utilizzati. I lead time dall'utilizzo della tecnologia AM sono diminuiti a 1-2 giorni e i costi di trasporto e spedizione sono stati eliminati (fonte MarkForged). Si possono osservare in questo caso relativo al settore energetico le

potenzialità descritte nel paragrafo precedente per quanto riguarda il concetto di Smart Factory raggiungibile attraverso l'impiego dell'AM.

Avendo analizzato 4 SC di produzione per i vari settori si possono mettere a confronto i vari lead time nella tabella qui riportata.

	Medico	Aerospace	Automotive	Energetico
Lead time tradizionale	20 gg	14 gg	220 h	27 sett
Lead time additive	3 gg	7 gg	120 h	20 sett
Riduzione percentuale	85%	50%	45%	25%

*Tabella 4: tabella confronto lead time su vari settori*

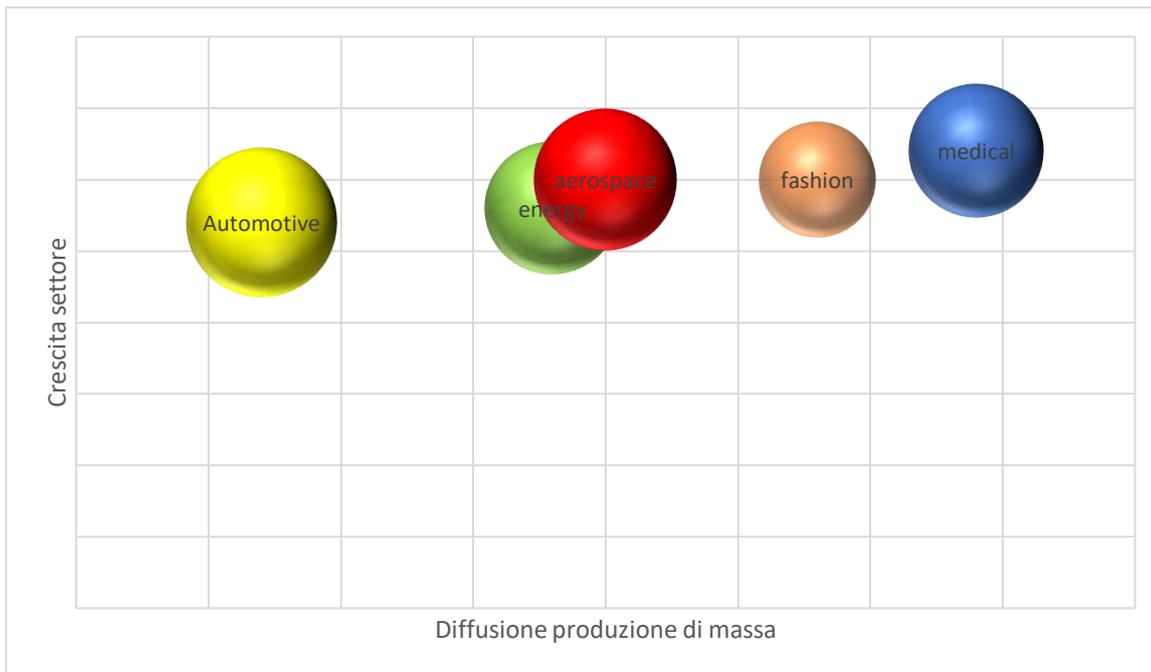
Si può notare come in 2 settori su 4 la riduzione del lead time sia vicina al 50 per cento, testimoniando come ci sia un vantaggio a livello di guadagno di tempo e reattività della catena con l'introduzione della fabbricazione additiva nelle SC dei settori manifatturieri: nell'esempio del settore medico il vantaggio è notevolmente più marcato poiché in quell'esempio si considerano anche i vantaggi a livello di servizio al cliente più veloce con un pezzo realizzato con tecnologia AM. Si può notare come nei vari flow-chart analizzati per settore diminuisca il numero di operazioni da eseguire per la realizzazione del prodotto, aiutando la diminuzione del lead time totale, diminuendo le code tra le varie stazioni (vedere figura 35-36 per settore automotive) e diminuendo la complessità della catena di approvvigionamento e produzione (vedere figura 38-39 per settore aerospace). Questi impatti avvengono per SC di settori diversi con categorie di prodotti diverso: prodotto finito con basso tasso di produzione altamente personalizzato (settore medicale), attrezzatura con alto grado di personalizzazione (settore automotive), prodotto finito di serie con alto tasso di

produzione (settore aerospace), forma personalizzata per la realizzazione del prodotto finito (settore energetico). Questo dimostra come l'AM possa riuscire ad impattare diverse tipologie di SC, senza essere ancora ancorata solamente all'ambito del rapid-prototyping: a livello di profittabilità economica ci sono ancora differenze tra le varie SC analizzate, poiché in quella relativa al settore energetico si ha un risparmio lungo la catena per i singoli pezzi prodotti con lo stampo realizzato, mentre invece per il caso medico il costo del pezzo lungo la SC è ancora superiore per quanto riguarda la tecnologia additive rispetto a quella tradizionale.

### **Specializzazione o produzione di massa ?**

Si è analizzato nei capitoli precedenti come l'AM nasca come una tecnologia votata alla produzione per piccoli volumi, con un'alta specializzazione e customizzazione del prodotto: questo paradigma sta lentamente cambiando, come testimoniato dagli esempi di Formlabs e di GE, citati in questo capitolo. Sempre per quanto riguarda il settore medico un esempio che intreccia alta customizzazione e produzione di massa è quello dell'azienda Align, la produttrice del prodotto Invisalign: è stata la prima azienda del settore a credere nelle potenzialità dell'AM per la produzione di questi apparecchi che richiedono un alto grado di specializzazione. L'utilizzo della SLA ha permesso di raggiungere un significativo tasso di produzione di circa 700 000 pezzi al giorno in tutti i loro siti di produzione (fonte Align Technology). Un'altra peculiarità all'interno di questo settore è l'assenza di barriere all'ingresso poiché il costo di una stampante Formlabs per la realizzazione di questi prodotti è solo di 3500\$, che hanno permesso negli ultimi anni a piccole start-up di diffondersi a livello locale, seguendo l'esempio dell'azienda Align. Questa è una grande differenza rispetto al settore aerospace citato precedentemente, dove si hanno esempi di produzione in serie, ma che possono essere sostenute a livello economico solamente da big company del settore come GE che riescono a sostenere il costo elevato dell'investimento in macchinari. Un'altra azienda

che ha scelto di implementare una produzione di massa con la tecnologia AM per i propri prodotti finiti è l'Adidas in collaborazione con l'azienda produttrice di stampanti 3D Carbon: è stata impiegata la tecnologia DSL per produrre la suola della scarpa con una struttura in lattice, che ha un tempo di realizzazione di soli 20 minuti garantendo un tasso di produzione di 100 000 paia di scarpe annuo. In questo caso non si sfrutta la possibilità di customizzazione del prodotto, ma l'impiego ha il fine di creare un design complesso esteticamente, garantendo una riduzione del peso del prodotto finale. Un'altra azienda all'interno del settore della moda che ha deciso di credere nella stampa 3D è Chanel che ha investito nello sviluppo della tecnologia SLS per la produzione dei mascara, in particolare nei pennelli, raggiungendo un tasso di produzione di circa 250 000 pennelli a settimane: trattandosi di una gamma di lusso, hanno deciso di creare una serie di pennelli con un design esclusivo, realizzato grazie all'utilizzo degli strumenti di progettazione 3D. In questo caso l'AM garantisce sia la possibilità di avere una produzione di massa, sia di avere un grado di personalizzazione che viene percepito dal cliente come valore. Il settore che rimane ancora più ancorato alla specializzazione e una produzione a basso volume è il settore automotive, dove come visto precedentemente ci sono varie barriere che impediscono la produzione di massa. Il settore aerospace è riuscito più ad entrare nella produzione di massa, almeno per alcuni componenti specifici, a differenza di quello automotive poiché i tassi di domanda del settore aerospace sono decisamente inferiori rispetto a quelli del settore automotive e gli investimenti di aziende del settore sono superiori rispetto a quelle del settore automotive che hanno portato a definire prima standard di qualità per inserire componenti AM nel prodotto finito.



*Figura 43: tabella analisi settore*

Il grafico in figura 43 riassume le grandezze dei vari settori analizzati e presi in considerazione nei paragrafi precedenti, evidenziando l'orientamento dei vari settori se più verso una produzione di massa o se ancora verso una produzione specializzata (l'asse y rappresenta la crescita del settore in percentuale e l'asse x la diffusione nella produzione di massa dei vari settori): la grandezza della sfera rappresenta l'ampiezza del settore percentuale rispetto ai dati visti nel capitolo III. Si nota quindi come nonostante la maggior diffusione dell'AM nel settore, il comparto automotive sia quello con il minor tasso di crescita e con la minor diffusione di produzione di massa all'interno del settore: nonostante i tassi di crescita siano molto simili per tutti i vari settori analizzati, si evidenzia una correlazione tra diffusione nella produzione di massa e prospettive di crescita migliori per il settore come si nota per i due settori fashion e medicale.

## **Investimenti futuri**

Nell'analisi dei vari settori svolta nei paragrafi precedenti si è già accennato ad alcuni investimenti eseguiti dalle maggiori aziende del settore in passato per garantire un

impulso alla crescita dell'AM nei settori manifatturieri analizzati. Come citato nei lavori e nei casi studi presi ad esempio, l'aspetto dell'evoluzione delle macchine e della tecnologia è fondamentale per garantire un miglioramento delle prestazioni dei processi, portando un possibile vantaggio significativo a livello di costi, aspetto che al momento non sia chiaro ed evidente e varia a seconda delle situazioni analizzate. Un investimento recente (inizio 2024) dal valore di 640 milioni di dollari è stato fatto da GE Aerospace per gli stabilimenti presenti sul territorio americano con diverse destinazioni d'uso e aree di ricerca: 54 milioni sono stati destinati a uno stabilimento in Alabama per la produzione di componenti per aerogiro militari, 107 milioni destinati a uno stabilimento in Ohio per un aumento della capacità di produzione di componenti di motori per veicoli commerciali. La restante parte è stata destinata ai vari stabilimenti dislocati sia in America che nel mondo per la ricerca di nuove macchine, nuove tipologie di utensili e nuovi impieghi di materiali per le produzioni inerenti al settore aerospace. Per quanto riguarda il settore automotive un importante investimento per gli anni futuri è stato fatto da Porsche che ha investito 150 milioni di dollari per la ricerca di materiali ad alte prestazioni da inserire nei propri prodotti: in questo caso Porsche non ha investito nei propri stabilimenti come fatto da GE, ma ha deciso di instaurare una collaborazione con la start-up cinese Intamsys, azienda leader nel mercato cinese dell'AM. Questi impulsi al settore non vengono solo dalle aziende produttrici dei prodotti finali, ma dalle aziende produttrici di stampanti stesse. Per il settore medicale, HP ha recentemente lavorato sul sistema software della propria stampante HP Jet Fusion 580/380 riuscendo a migliorare la diagnostica per la realizzazione per modelli anatomici per diagnostica e per processi; anche Siemens ha lavorato in collaborazione sia con HP che con ExOne per la realizzazione di un software implementato in un loro stabilimento in Regno Unito in grado di individuare possibili deformazioni durante la produzione del prodotto dando la possibilità di modificare il prodotto prima della produzione definitiva, evitando problemi nella fase di utilizzo. Per il settore energetico gli investimenti da parte delle start-up si stanno concentrando sullo sviluppo di nuovi prodotti realizzati con tecnologia AM: ad esempio, la start-up Graphene si sta

occupando dello sviluppo di batterie con al loro interno l'utilizzo di filamenti di grafene per la realizzazione degli elettrodi a disco, al fine di rinforzare la struttura di litio e migliorare la conduttività e la sostenibilità della batteria.

# Capitolo VI

## AM e sostenibilità

La sostenibilità è diventata un tema cardine all'interno delle aziende negli ultimi decenni e ogni scelta strategica ad oggi viene eseguita considerando anche la sostenibilità di essa dal punto di vista economico, ambientale e sociale. Le aziende nella scelta di introdurre la tecnologia AM nelle loro SC tengono conto delle potenzialità di questo tipo di manifattura dal punto di vista della sostenibilità come la possibilità di utilizzare materiali più leggeri, di utilizzare meno materiale nella produzione o di avere minori di emissioni legate al trasporto grazie all'opportunità di avere una struttura più decentralizzata. In questo capitolo si andranno ad analizzare quindi le potenzialità legate all'AM nell'ambito della sostenibilità, attraverso anche l'analisi di casi studio e di esempi quantitativi.

### Definizione e analisi

Per manifattura sostenibile si intende *“la capacità di utilizzare in modo intelligente le risorse naturali per la produzione di prodotti e soluzioni che siano in grado di soddisfare obiettivi economici, ambientali e sociali grazie alle nuove tecnologie, ai comportamenti sociali coerenti e alle misure normative con il fine ultimo di preservare e di migliorare continuamente la qualità della vita umana”* (Garetti et Taisch, 2017). Le tecnologie abilitanti all'industria 4.0 come la tecnologia AM si configurano come un'opportunità per riuscire a raggiungere questo scopo, anche se la loro introduzione deve essere ponderata per evitare di portare squilibri ai tre pilastri della sostenibilità (economico, ambientale e sociale). Lo sviluppo sostenibile *“deve essere uno sviluppo*

che va ad incontrare i bisogni delle generazioni attuali, senza compromettere quelli delle generazioni future”(Brundtland Commission): essendo la tecnologia AM una tecnologia ancora immatura, vanno compresi quelli che possono essere i suoi possibili effetti sui tre pilastri, per comprendere se possa effettivamente portare a un cambiamento sostenibile a livello della manifattura. I metodi di analisi che vengono implementati sui possibili impatti dell’introduzione della tecnologia AM, come per anche altre tecnologie si basano sulle linee guida della Life Cycle Analysis (LCA): infatti è fondamentale che si tenga in considerazione tutti i possibili impatti del prodotto in questione e che si analizzino con la massima accuratezza. Lo standard ISO 14040 (2006) ha creato un protocollo con 4 step per applicare il metodo LCA.

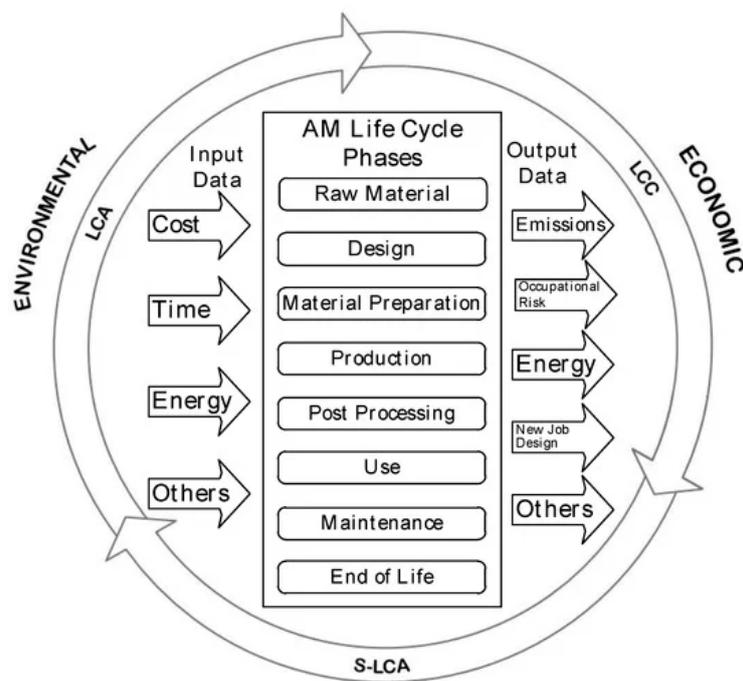


Figura 44: schema analisi LCA

Il primo step riguarda la definizione degli obiettivi e dei confini nei quali verrà affrontata l’analisi (“Goal and scope”): è fondamentale questo primo passaggio per definire quella che sarà l’unità funzionale per misurare tutto quello che avviene all’interno dei confini dello studio. Il secondo step viene definito la “Inventory Analysis” dove vengono identificati e quantificati tutti i vari flussi fisici in input e

output all'interno dei confini dello studio in esame: questo elenco ed individuazione di flussi deve essere realizzata nel modo più esaustivo possibile per evitare di dimenticare aspetti fondamentali nell'analisi svolta. Il terzo step è quello dell' *"Impact assessment"* in cui vengono divisi i vari flussi analizzati precedentemente per tipologia d'impatto e quantificazione dei danni, dando loro un peso. L'ultimo step è quello dell' *"Interpretation"* in cui vengono analizzati i flussi con i rispettivi impatti e interpretati sulla base degli obiettivi iniziali per stilare le possibili conclusioni e raccomandazioni relative allo studio.

Questi tipi di analisi lifecycle vengono eseguite per i vari pilastri della sostenibilità prendendo nomi diversi e tenendo conto di parametri diversi a seconda degli ambiti: ad esempio la Life Cycle Costing (LCC), riguardante l'ambito economico, ha come parametro fondamentale per giudicare la sostenibilità di un progetto il Net Present Value (NPV), mentre per quanto riguarda l'ambito ambientale il tipo di analisi eseguite prende il nome di Social life Cycle Analysis (S-LCA). Gli articoli di letteratura riportati in seguito, utilizzano questa metodologia per quantificare l'impatto dell'AM nei vari aspetti della sostenibilità. Dall'analisi della letteratura si nota come ci sia una grande fiducia sulle potenzialità dell'additive manufacturing legate alla riduzione dei costi e alla riduzione dell'impatto ambientale nella produzione di prodotti: le caratteristiche definite e citate nei capitoli precedenti sono un'opportunità non solo per dare un vantaggio competitivo in termini di KPI aziendali, ma anche in termini di sostenibilità. La possibilità di riciclare le polveri metalliche e di avere prodotti finiti con caratteristiche personalizzate e con una topologia più efficiente sono alcuni dei benefici a livello di sostenibilità promessi dall'introduzione dell'AM nel settore manifatturiero (Jiang et al, 2020). L'AM si configura come un processo manifatturiero digitale in cui, grazie all'utilizzo di tecnologie come la modellazione CAD, la simulazione della linea, l'utilizzo di sensori sul prodotto, si può arrivare a un processo produttivo dove vengono minimizzati gli errori di produzione; questo come si è osservato nei capitoli precedenti da sia un vantaggio a livello di time-to-market, sia a livello di sostenibilità si possono minimizzare quelli che sono gli scarti derivanti dal processo (Ott et al,2019).

In molti casi, come visto precedentemente nelle analisi sulle applicazioni aerospace e automotive, i pezzi realizzati con tecnologia AM vengono utilizzati come componenti all'interno del prodotto finito, al fine di ottimizzare il peso e l'aerodinamica del veicolo: i vantaggi a livello di impatto ambientale non si hanno quindi solo nella produzione del componente, ma anche nell'utilizzo del prodotto finito sia per l'intero eco-sistema che per l'utente finale che diminuisce quelli che sono i suoi consumi (Daraban et al, 2019). Un'altra riduzione di spreco riguarda l'impiego di materiale utilizzato, in quanto l'ottimizzazione delle geometrie impiegabili permette a parità di componente di utilizzare meno materiale rispetto a quelle che sono le tecnologie di manifattura tradizionale; in molti casi si riescono a combinare prodotti finiti (ad esempio componenti elettronici) in maniera efficiente utilizzando sia parti in AM che parti realizzate con tecnologia tradizionale. Una SC con AM può creare un sistema in cui le distanze di trasporto sono più ravvicinate tra di loro, in cui interi tier vengono eliminati, in cui i livelli di magazzino sono minori; inoltre, la produzione on demand permetterebbe di evitare la produzione di componenti che in molti casi rimangono inutilizzati evitando un inutile spreco di materiale, in molti casi anche difficile da smaltire e da riutilizzare (Minetola et al,2017). Questo tipo di configurazione in letteratura viene definita green supply chain, una struttura che ha iniziato a diffondersi in questo decennio: uno dei primi step è riuscire a ridurre le distanze di trasporto e quindi di conseguenza la quantità di CO2 utilizzata. Questo vantaggio può essere doppio poiché le distanze non vengono minimizzate e ridotte solo nella consegna del prodotto al cliente, ma anche nel processo di reverse logistics sempre più diffuso come citato nel capitolo 1. Il formato digitale dell'AM permette di avere una diminuzione dei magazzini o in alcuni casi una totale assenza: questo permette alle aziende di risparmiare lo spazio occupato dalle loro strutture, diminuendo quello che è il loro impatto ambientale. Lo spazio risparmiato potrebbe essere utilizzato per piantare alberi o installare impianti di energia sostenibile per alimentare l'energia consumata nel resto della SC (Michelle,2018).

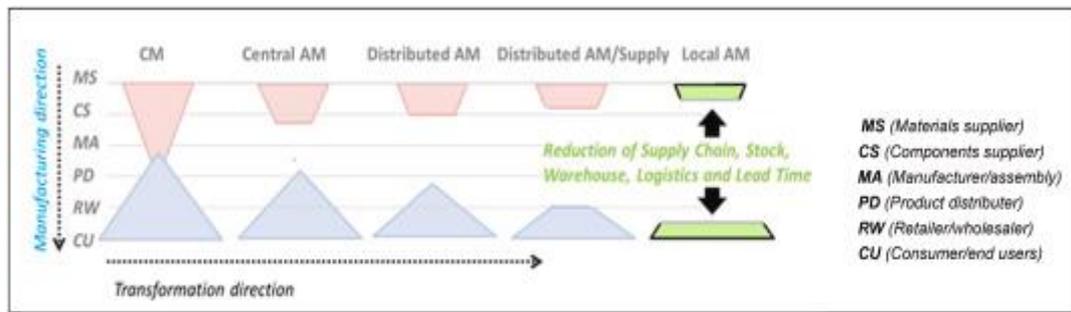


Figura 45: trasformazione della SC verso una Green SC con AM

Il tema dei materiali impiegati, del loro riciclo e della loro sicurezza è uno degli aspetti più interessanti relativi al legame tra AM e sostenibilità. A livello di plastiche, quella più utilizzata è il PLA, anche per la sua facilità di riciclo grazie alla ri-estrazione dei suoi filamenti per essere adatta all'utilizzo per AM. Altre plastiche che si possono riciclare sono l'ABS, Poliammide (PA), Polietilene Tereftalato (PET), Polietilene ad alta densità (HDPE), anche se non mantengono tutte le stesse proprietà meccaniche dopo diversi cicli di riciclaggio (Khoo,2019). Per i metalli, le polveri metalliche utilizzate (polvere di nickel, alluminio, titanio), hanno il vantaggio di poter essere riutilizzate e di avere un buy-to-fly ratio migliore rispetto ai componenti equivalenti realizzati con tecnologia tradizionale. A livello di materiali ceramici e compositi, il riutilizzo di questi materiali è ancora in fase sperimentale e riguarderebbe soprattutto il vetro per i materiali ceramici (Marchetti et al,2019) e il rinforzo dei componenti AM con materiali compositi, attraverso l'utilizzo di fibre di nylon riciclate (Farina et al, 2017). Esistono però preoccupazioni relativamente all'utilizzo della tecnologia AM in quanto ABS, PLA e nylon possono generare problemi di salute a causa delle forme volatili organiche generate come stirene, butanolo, cicloesano ed etilbenzene (Wojtylia et al,2017). Si è osservato come l'emissione di particolato e di componenti organici volatili avvenga soprattutto nel momento in cui il pezzo viene estratto, dopo lo spegnimento della stampante. Ci sono numerosi studi al momento per capire il potenziale impatto di queste componenti sull'essere umano e allo stesso tempo per capire come ovviare al possibile contatto tra l'operatore e il particolato: un possibile rimedio è un differente riscaldamento della piattaforma che ha mostrato una

significativa riduzione nell'emissione di particolato (Deng et al,2016). Per evitare un degradamento del prodotto e delle sue proprietà durante i cicli di riciclaggio, si cercano di eseguire più processi di asciugatura e di aspirazioni per i prodotti realizzati con queste plastiche in modo da diminuire le tracce di acque e di acidi che nel lungo periodo possono portare ad una possibile scissione della catena polimerica e a un peggioramento delle proprietà del prodotto (Messmer,2019).

A livello di sostenibilità economica, i possibili benefici dell'introduzione dell'AM sono stati trattati nei precedenti capitoli come riduzione dei costi della supply chain, e come minor costo in attrezzature, personale e trattamenti di post-processo. Un altro vantaggio in termini di sostenibilità economica è la possibilità di avere la produzione di prototipi a un costo minore e con un migliore complessità e realistica delle forme. A livello di sostenibilità sociale, la letteratura non presenta un'ampia produzione sui possibili effetti dell'introduzione dell'AM a livello di società. Un contributo interessante viene da un articolo di Huang (Huang et al, 2019) dove vengono analizzate le possibili condizioni dei lavoratori e il loro miglioramento nel caso di introduzione dell'AM nel settore manifatturiero; una necessità per raggiungere questo miglioramento è formare della manodopera qualificata, poiché questa tecnologia richiede un livello di specializzazione e competenze più alto rispetto a quella che è una manifattura tradizionale.

Un aspetto preso in considerazione da quest'analisi è il possibile cambiamento a livello sociale negli attori della produzione: con l'AM si può arrivare ad una democratizzazione della produzione con il consumatore finale che non è più solamente passivo, ma attivo nella realizzazione del prodotto. Questo si collega ai possibili modelli di business del settore biomedico citati nel capitolo 5, dove si è analizzato come potrebbe essere possibile avere un sistema di produzione delle parti mediche in cui viene coinvolto anche l'utente finale nella produzione. Un aspetto negativo a livello sociale che rimane da chiarire nel lavoro di Huang è la difficoltà di chiarire la proprietà intellettuale dei disegni, soprattutto nel caso in cui si sviluppasse modelli di business come quello precedentemente descritto in cui gli utenti finali diventano anch'essi

produttori. Una possibile soluzione per ovviare a questo problema e per avere un miglior controllo della SC decentralizzata potrebbe essere la creazione di una piattaforma che metta in comunicazione tutti gli enti presenti nella SC: questo servirebbe non solo per avere una tracciabilità del prodotto lungo tutte le fasi della catena, ma anche per ovviare ai problemi di diritti di proprietà intellettuale in quanto tutte le azioni svolte dai vari attori vengono notificate e certificate all'interno di un ambiente cloud protetto (Wu et al, 2022).



*Figura 46 : ecosistema dell'Additive Manufacturing*

Prima di analizzare un caso specifico riguardante l'utilizzo di parti in titanio realizzate in AM all'interno dell'industria aerospace e automotive, si riassumono gli aspetti visti finora con la creazione di una tabella qualitativa (Business Model Canvas) per comprendere quali possano essere qualitativamente i limiti, i benefici e i vari attori coinvolti a livello di sostenibilità nella produzione di ricambi in titanio all'interno del settore aerospace. Le celle evidenziate in blu riguardano gli aspetti legati alla sostenibilità economica, quelli in verde legati alla sostenibilità ambientale e in giallo quelli legati alla sostenibilità sociale.

Stakeholder per input	Attività	Value proposition	Relazioni con stakeholder	Stakeholder per output
Fornitore di ricambi	Design per AM	Riduzione potenziale della complessità	Feedback sull'ingegnerizzazione delle parti AM	Compagnie aeree necessitano di manutenzione sulle parti AM
Fornitore di materiali	Design per ricambi	Libertà di design		
	AM dei ricambi	Riduzione del lead time		
	Governance			
Produttore di equipaggiamento AM	<b>Risorse</b>	Realizzare un prodotto che riduca le emissioni nella fase di utilizzo dell'aereo		I passeggeri hanno voli più green
Fornitore di energia	AM equipaggiamento			
	AM materiali	Miglioramento delle skills e della qualità dei lavoratori		Società con voli più sostenibili
	Materie prime			
Società in generale	Lavoratori			
	Materie Prime			
	Lavoratori qualificati			
	<b>Limiti</b>	<b>Benefici</b>		
Nuovi equipaggiamenti	Nuove materie prime (polveri metalliche)	Meno peso e materiale impiegato	Meno spreco di materiale in produzione	Supporto impiego locale
Forza lavoro specializzata	Consumo energetico	Parti con più valore	Meno utilizzo carburante in uso	Miglioramento qualifica lavoratori
Costi più alti materie prime	Emissioni locali (produzione)			Miglioramento resilienza dell'azienda

Tabella 5: Business-Model Canvas per SC titanio con AM

## Caso titanio

Come citato nel capitolo precedente, molte delle applicazioni AM nel settore dei trasporti mirano a un miglioramento delle performance di consumo del carburante e di energia tramite la riduzione di peso dei componenti utilizzati (3D systems corporations, 2018). Tra i materiali più utilizzati per questo scopo c'è il titanio e le sue leghe: l'uso di componenti più leggeri permette anche di garantire più alti standard di sicurezza in caso d'incidente in quanto permette di ridurre l'energia di collisione riducendo le probabilità di infortunio dei passeggeri (Hyundai Motor Group, 2019). Il titanio è sempre stato usato per la realizzazione di prodotti ad alte prestazioni per le sue ottime proprietà fisiche (alto resistenza con poco materiale impiegato, ottima resistenza alla corrosione), ma la sua applicazione è sempre rimasta circoscritta a questi settori a causa dell'alto impiego di energia per la sua estrazione: a parità di quantità con un qualsiasi acciaio, viene impiegata una quantità di energia 10 volte superiore (Digital Alloys, 2019). Una crescente diffusione del titanio a livello di applicazione è avvenuta con l'impiego di questo materiale nella tecnologia AM che offre numerosi vantaggi nella manipolazione di questo materiale rispetto alle tecnologie tradizionali, in particolare

per quanto riguarda la percentuale di materiale scartato. Un parametro utilizzato per misurare il vantaggio in termini di materiale scartato è il buy-to-fly ratio, ovvero la percentuale di peso tra la materia prima e il prodotto finale; nel caso di tecnologie tradizionali il BTF è circa 8:1 contro l'1,5:1 delle tecnologie AM, senza tener conto della possibilità da parte della tecnologia AM di creare parti complesse e design progettati per avere forme con minor peso (Liu, 2017). Inoltre, le polveri di titanio impiegate nella produzione spesso possono essere riutilizzate con materiale vergine per ridurre ulteriormente gli sprechi della produzione (Harkin et al., 2020): il recovery rate nella tecnologia PBF è circa del 96%. Questo alto tasso di riutilizzo e di recupero sono molto importanti da considerare per un materiale che è stato classificato dalla Commissione Europea come “*critical raw material*” ovvero “una qualsiasi sostanza che impiegata in manifattura è soggetta a rischi di fornitura e per la quale non vi sono sostituti immediati” (US Energy Protection Agency, 2014); per questo motivo le aziende che impiegano Titanio provano a rafforzare la loro SC, recuperando il più possibile la polvere dopo la lavorazione e progettando componenti che richiedano il minor impiego di materiale possibile, raggiungendo con questo anche l'obiettivo della riduzione di peso dei componenti (Golroudbary et al., 2022) . Un altro obiettivo per le aziende del settore aerospace e automotive è quello di limitare i consumi e le emissioni dei loro veicoli, non solo per migliorare le proprie performance, ma anche per incorrere in multe e sanzioni sui limiti di emissioni fissati negli ultimi decenni (European Commission, 2021). Per questo motivo ad oggi, all'interno di un aereo Boeing e di un Airbus rispettivamente il 17% e il 15% dei componenti sono utilizzati in lega di titanio (Zhu et al, 2018). A livello di guadagno in termini di riduzione di peso ci sono molti studi sia in ambito automotive che aerospace che quantificano i vantaggi: una riduzione del peso in un autoveicolo tra l'1 e il 10% porta a un risparmio in termini di consumo di carburante tra l'0,7-8% (Veichle technology office, 2014), mentre una riduzione di peso del 5% porta a un aumento delle performance del motore del 4,5% (Hyundai Motor Group, 2019). Nel settore aerospace è stato invece stimato che per ogni 1000 kg di peso vengono generati annualmente 1000 kg di CO<sub>2</sub> (Additive-X,

2019). Un interessante caso studio è stato realizzato da Nyamekye nel 2023, per capire quale possa essere effettivamente il risparmio in termini di peso utilizzando una tecnologia tradizionale e la tecnologia AM: il caso studio riguarda la produzione di otto diversi componenti prodotti con lega di titanio di un'auto di lusso (connettore, molla della valvola, molla delle sospensioni, sistema di scarico, pinza del freno, spoiler, rivestimento dei sistemi di scarico, valvola del motore) (Nyamekye et al, 2023).

Si riportano nelle figure 47 e 48 le strutture delle due catene di approvvigionamento e produzione per le due tipologie di produzione (tradizionale vs AM):

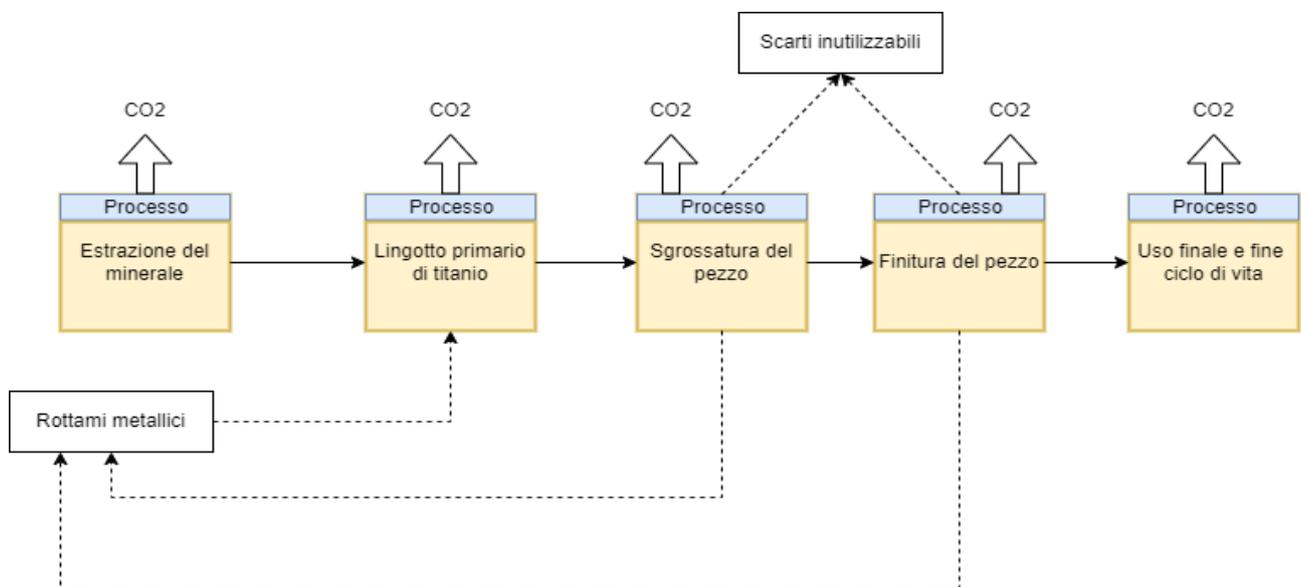


Figura 47: SC componente in titanio tradizionale

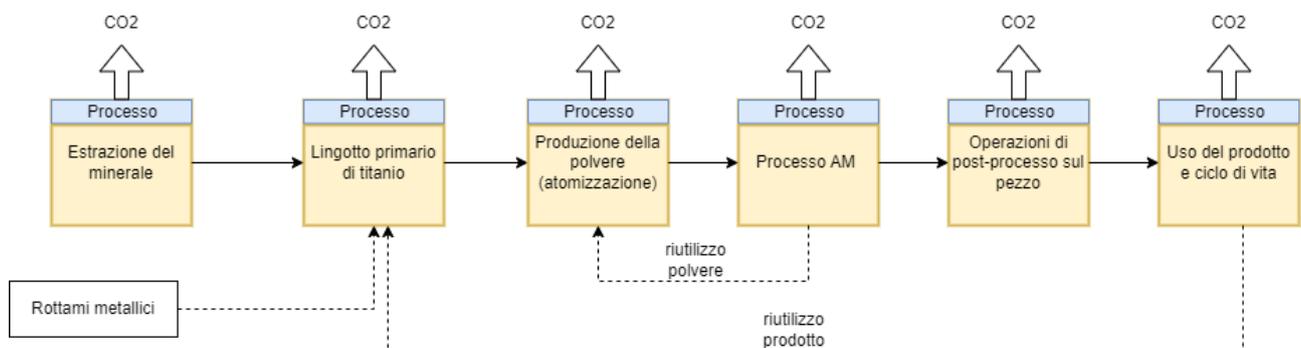
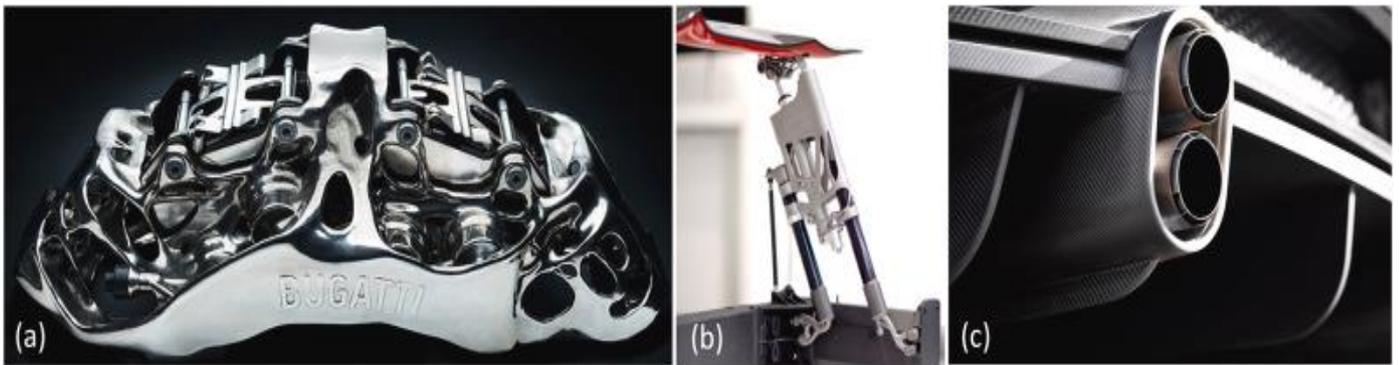


Figura 48: SC componente in titanio con AM

nei due grafici sono evidenziati a livello qualitativo per ogni fase dei processi dove sono presenti emissioni, dove i materiali impiegati vengono scartati e dove invece c'è la possibilità di riciclo. Si nota come l'AM, oltre ad avere un minor BTF, permetta di riutilizzare le polveri di titanio scartate dall'operazione in un nuovo ciclo di lavorazione.



*Figura 49: parti di auto di lusso considerate nel caso studio*

Per questo caso studio, è stato ipotizzato di utilizzare il BTF presentato da Liu nel 2017 (8:1 per le tecnologie tradizionali, 1,5: 1 per la tecnologia AM) e di considerare di utilizzare questi componenti in titanio per la produzione di tutti gli autoveicoli del settore car-luxury (552.000 macchine): a livello di utilizzo di materie prime il risparmio è di circa 333 kt, mentre sul peso totale dei componenti finiti installati, grazie al diverso design, il risparmio è sul totale del segmento di 14kt (Nyamekye et al, 2023).

Il risparmio di materia prima utilizzata è pertanto di 1,4kt a veicolo, valore significativo considerando la scarsità di titanio come materia prima: in questo caso il risparmio in termini di peso per veicolo nella transizione da una tecnologia tradizionale a una tecnologia AM è di circa 40 kg, mentre invece per un aircraft può arrivare fino a 820 kg (Huang et al, 2016). Se si considera il peso medio di una sportscar di 1565 kg (Statista, 2020b), il risparmio in termine percentuale di peso è circa del 2,5% che porta secondo i dati visti precedentemente un risparmio di circa il 2% in termini di consumi.

## Emissioni sulla supply chain

Numerosi studi indagano quelli che sono i consumi totali di energia e di emissioni di CO<sub>2</sub> all'interno di una SC tradizionale e all'interno di una SC con AM. Lo studio di Liu citato nel paragrafo precedente è significativo in quanto fissa il BTF e la differenza di rapporto di materiale usato tra una manifattura tradizionale e la tecnologia AM. Liu individua tre macro-attori nella produzione di energia: le materie prime, la produzione e il trasporto. Per materie prime s'intendono l'energia spesa per la produzione delle materie prime e per la produzione della polvere nel caso dell'impiego della tecnologia AM. Sotto la voce manifattura, viene intesa l'energia spesa dalla macchina per produrre il pezzo (circa 4 volte in più in quest'analisi per quanto riguarda la tecnologia AM rispetto a una tecnologia tradizionale), mentre la voce trasporto racchiude sotto di essa il trasporto delle materie prime dal luogo di estrazione all'OEM e il trasporto del prodotto dall'OEM al cliente finale. I risultati delle simulazioni mostrano come una configurazione tradizionale raggiunga un livello di emissioni di CO<sub>2</sub> circa 4 volte superiore rispetto a una SC con AM centralizzata (1089t di CO<sub>2</sub> vs 280t di CO<sub>2</sub>): la riduzione avviene per la voce trasporto e significativamente per la voce materie prime, poiché il BTF nel caso AM diminuisce in maniera importante l'utilizzo di materie prime e di conseguenza anche le emissioni legate al loro trasporto. Un'ulteriore riduzione a livello di emissioni c'è nel caso di una SC AM decentralizzata, dovuto alla riduzione delle emissioni per quanto riguarda il trasporto del prodotto finito al cliente (261t di CO<sub>2</sub>). Si nota come nel caso di una SC con AM, la voce manifattura diventa significativa a livello di emissioni totali passando dall'1% dello scenario con manifattura tradizionale al 23% di SC con AM. Nei capitoli precedenti, si era evidenziato come una possibile evoluzione delle macchine AM possano portare vantaggi a livello economico per queste configurazioni di SC: questo caso conferma come l'evoluzione delle macchine possa portare vantaggi anche a livello di minimizzazione di emissioni totali della catena, aspetto sempre più decisivo nell'andare verso la creazione di *Green Supply Chain*. È interessante notare da un altro

caso studio realizzato da Rupp, come sia determinante dal punto di vista delle emissioni l'ipotesi fatta da Liu sul BTF: infatti, Rupp esplora diversi scenari di BTF ed evidenzia come con un BTF di 2:1 la tecnologia tradizionale sia a livello di emissioni totali sulla SC più conveniente rispetto a una tecnologia AM, in quanto la tecnologia AM ha più emissioni come visto in precedenza nella fase di manifattura. A livello di caso d'uso, Rupp analizza poi uno scenario in cui il BTF per la tecnologia tradizionale è del 4,5:1 portando a una riduzione in questo caso del 50 % delle emissioni di CO<sub>2</sub>. In questo caso studio non viene esplorata la differenza tra un SC AM centralizzata vs decentralizzata, poiché la situazione AM che viene presentata è già decentralizzata. Si evidenzia da questi due casi come a livello di emissioni l'impatto più grande a livello nella SC con AM riguarda la produzione di materie prime, poiché permette di avere una significativa riduzione del BTF rispetto a una tecnologia tradizionale; l'impatto a livello di trasporto per una SC decentralizzata esiste, ma in misura più contenuta rispetto a quella dato dalla variazione del BTF con l'introduzione di una tecnologia AM.

In figura 50 è riportata una tabella che mostra per vari settori applicativi le previsioni relative all'impatto dell'AM sulla Total Primary Energy Supply (TPES) e a livello di emissioni di CO<sub>2</sub>, ipotizzando diversi scenari di andamento del mercato ( assenza di presenza tecnologia AM, sviluppo mercato alto o basso e intensità dei processi alto o basso) e osservando la variazione percentuale in termini di consumi energetici ( rappresentata sull'asse y del grafico). Si nota come i mercati e i settori con la prospettiva di riduzione più alta per quello che riguardano l'energia consumata nei processi e le relative emissioni legate ai processi, siano quelli aerospace e medicale, con il mercato automotive che non ha invece ancora queste prospettive.

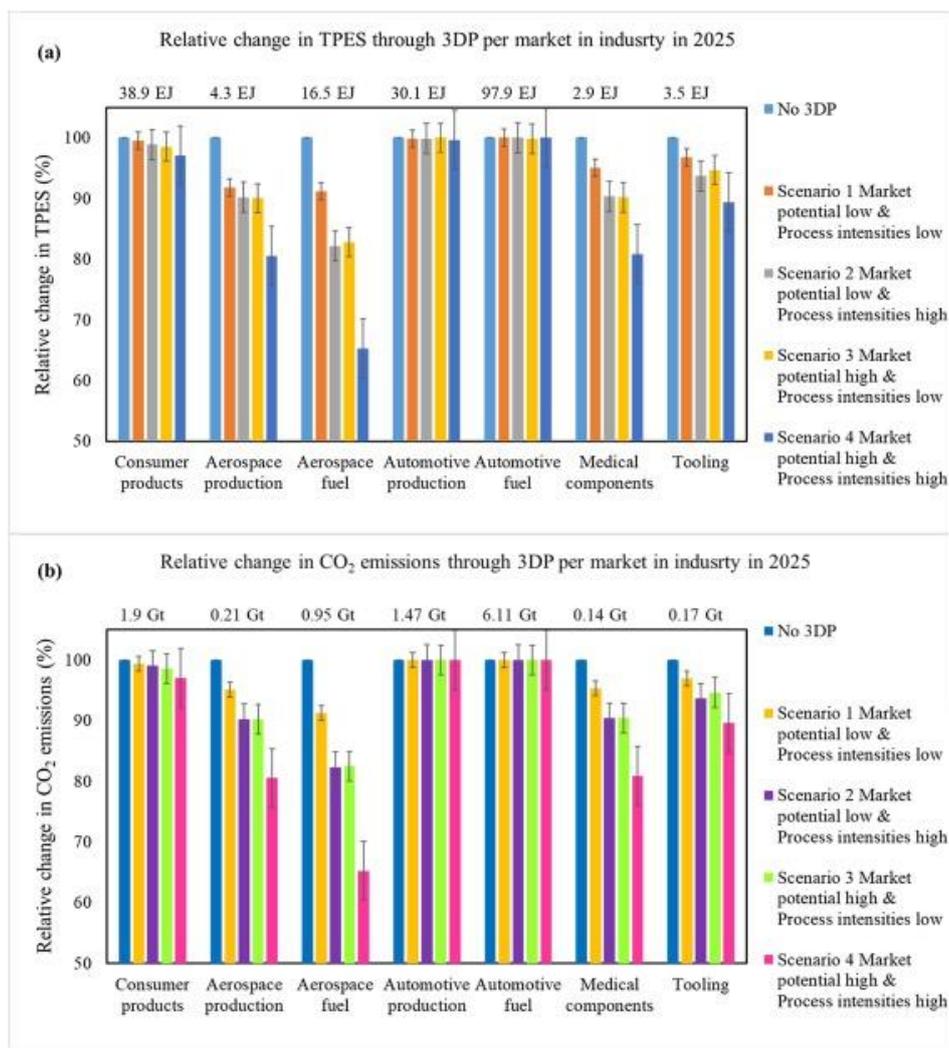


Figura 50: aspettative consumi energetici su SC con AM per settore

Dalla figura 50 si osserva come non sia ancora prospettata questa riduzione per il settore automotive e questo si può spiegare in parte con le osservazioni fatte nel capitolo V, relativamente alla diffusione del settore automotive nel settore di massa: infatti per quanto riguarda il consumo di carburante non vi è prospettata una diminuzione significativa delle emissioni e dei consumi energetici, poiché non è ancora prospettata un'applicazione della tecnologia AM a livello di componenti per il prodotto finito. Si evince in questo grafico quello già citato nei paragrafi precedenti del capitolo, ossia l'AM abbia una grande potenzialità per la riduzione dei consumi energetici e a livello di emissioni del prodotto finito come testimoniato dalle potenziali riduzioni riportate nel grafico per le colonne del settore aerospace e del consumo di carburante legato al settore stesso.

## Innovazioni sostenibili

Le applicazioni e i settori AM analizzati nel capitolo V rappresentano i settori in cui l'AM ha avuto al momento uno sviluppo più significativo: esistono però nuove applicazioni dell'AM in altri settori, spesso ancora in fase embrionale, ma che si prospettano come interessanti a livello di impatto sulla SC di questi settori. Il primo settore analizzato è quello del food, dove si sta osservando un'implementazione della tecnologia AM per la realizzazione di cibi: un preparato, spesso ricavabile da vari scarti di cibo ancora commestibile, viene estruso dall'ugello della stampante per la realizzazione layer-by-layer del prodotto finito, come avviene per la componentistica analizzata precedentemente. Un grande lavoro di sperimentazione al momento è nella scelta della giusta composizione del preparato, poiché a seconda della viscosità del prodotto cambia la velocità di estrusione del filamento; al momento si sta sperimentando l'aggiunta degli idrocolloidi per cercare di diminuire la viscosità del materiale estruso, senza andare a perdere la solidità e la durezza del prodotto, che altrimenti rischia di non rimanere integro per il successivo utilizzo. In questa fase di sperimentazione, si sono notati i limiti attuali della tecnologia: la mancanza di un personale specializzato per la preparazione del materiale e soprattutto i lunghi tempi di produzione e gli alti costi rispetto al ciclo di vita del prodotto, che ha una durata molto ridotta confrontata ad altri prodotti realizzati con tecnologia AM. Un vantaggio che può portare l'AM in questo settore riguarda la possibilità di personalizzare il cibo a livello di contenuto nutrizionale, aspetto che può essere utile per le persone che devono seguire delle diete speciali, garantendo sempre il giusto apporto per l'utente finale. Un altro vantaggio è la possibilità, come vale per applicazioni in altri settori, di avere un prodotto personalizzabile a livello di design per offrire sia un prodotto finale gradevole a livello estetico, ma anche per diminuire i possibili sprechi a livello di cibo, ottimizzando quella che è la quantità di cibo impiegata (Alami, 2024).

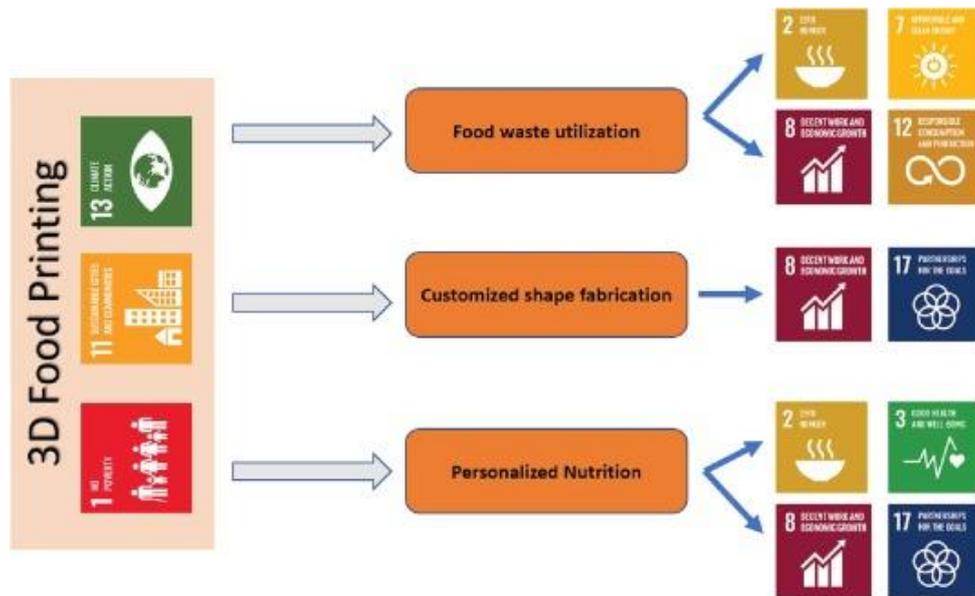


Figura 51: impatto sui vari Sustainable Development Goals

Nella figura 51 sopra riportata si evidenziano come le tre caratteristiche analizzate precedentemente a livello di sostenibilità impattino sui vari punti dello Sustainable Development Goals (SDG), promulgato dalle Nazioni Unite.

L'altro settore in fase embrionale ma con grandi possibilità di crescita e di sviluppo è quello delle costruzioni, in particolare per quanto riguarda la realizzazione di abitazioni con tecnologia AM; ci sono ancora poche start-up nel settore e sono tutte concentrate nel mercato americano, dove la mancanza di case (circa 3 milioni secondo le stime del governo americano) rappresenta un'opportunità per questa nuova tecnologia di attestarsi. Le prime abitazioni che sono state realizzate con questa tecnologia presentano dei vantaggi evidenti sia in termini di costo che in termini di semplificazione della SC: se mediamente i tempi per la costruzione di una casa negli Stati Uniti (da inizio scavi fino alla consegna casa) sono di circa 4 mesi, con la tecnologia AM questi tempi vengono dimezzati. Un vantaggio ulteriore è quello di risparmio di forza lavoro nel processo di costruzione: mediamente per la costruzione di un'abitazione sono necessari circa 30 operai, mentre con una tecnologia AM sono necessari solamente 3 operatori (dati 3D Printed House). Un possibile risparmio nell'utilizzo di questa tecnologia si avrebbe anche nel minor impiego di attrezzature e di materiale, come avviene già in altre applicazioni. La costruzione di queste abitazioni

viene svolta da una piattaforma robotica azionata da un operatore che deposita una mistura di cemento, portando alla realizzazione del prodotto finale layer-by-layer. In questa fase di sperimentazione della tecnologia, c'è un grande studio sulla scelta delle misture da usare, analizzando diversi fattori che possono fare la differenza per la bontà del prodotto finale: dopo il deposito dello strato è fondamentale che la mistura si raffreddi mantenendo la forma desiderata e con una contrazione controllata nel tempo per evitare problemi strutturali nel prodotto finale.



*Figura 52: macchinario AM per la realizzazione di case*

Spesso per ottenere queste caratteristiche, vengono aggiunti fibre di vetro e polimeri per migliorare le prestazioni di questi materiali. Una novità rispetto agli altri tipi di tecnologia additive è la possibilità di costruire un prodotto di grandi dimensioni, senza dover affrontare il limite di struttura tipico dei macchinari AM. Come visto nel settore medico, questo tipo di applicazione potrebbe essere usata per far fronte a situazioni emergenziali, in cui è necessario ricostruire dopo una calamità naturale una grande quantità di abitazioni in poco tempo: rispetto a un metodo tradizionale, i minori lead time garantirebbero una più veloce consegna delle case alla popolazione, con un impatto immediato a livello sociale. I limiti per la diffusione di questa tecnologia sono ancora la mancanza di standard di sicurezza definiti per la costruzione di queste case,

la mancanza di una manodopera specializzata e la difficoltà nella deposizione del materiale. Per quest'ultimo punto le problematiche riscontrate sono le condizioni atmosferiche che spesso non garantiscono la giusta umidità per permettere una corretta solidificazione del materiale al fine di ottenere una struttura solida nel tempo (Ayyagari,2023).

## Discussioni e conclusioni

L'obiettivo di questo lavoro era indagare se esistesse un impatto dell'AM sulla SC del settore manifatturiero, capire quali fossero i possibili impatti e le prospettive future di crescita di questa tecnologia all'interno della SC. L'analisi è partita dal comprendere quali fossero le due macro-aree oggetto dello studio: l'ambito della Supply Chain Management e le caratteristiche e tipologie di tecnologia AM. Da quest'ultima trattazione si è potuto comprendere la complessità di questa tecnologia a livello di tipologie di fabbricazione, di materiali e come descritto nel capitolo successivo di applicazione. Gli orizzonti quindi che si aprono per l'affermazione di questa tecnologia sono molteplici e per semplicità di trattazione si è deciso di individuare quattro settori di riferimento per le analisi dei capitoli successivi: medicale, automotive, aerospace ed energetico. Come affermato nell'introduzione, l'AM ha iniziato un percorso di affermazione e di crescita già prima del periodo pandemico, che come analizzato nel capitolo 3 sta continuando con prospettive importanti di crescita per i decenni futuri: un percorso di affermazione e crescita che riguarda tutte le più importanti aree produttive mondiali (Asia, Europa e Nord America). Nell'analisi di questi trend si è operata una distinzione a livello di tipologia di materiali impiegati, di settore applicativo poiché ci sono delle differenze a livello di sviluppo della tecnologia AM a seconda dei materiali utilizzati e del settore preso come riferimento. L'analisi successivamente si è spostata nel capitolo IV sulla discussione vera e propria dell'impatto di questa tecnologia sulla SC. Per prima cosa si è osservato quello che era già stato accennato nell'introduzione, ovvero come ci sia un legame tra lo sviluppo e la diffusione della tecnologia AM e la situazione che stanno vivendo le SC mondiali: in un'epoca dove sono aumentate le disruption a causa di SC sempre più lunghe e complesse, la tecnologia AM viene percepita dalle aziende manifatturiere come una possibile soluzione per fronteggiare questo problema e questo si può anche ricollegare alle buone prospettive di crescita di questa tecnologia analizzate nel capitolo 3. Per

quello che concerne l'impatto dell'AM sulla SC, i possibili cambiamenti analizzati nel capitolo IV sono:

- **Cambiamento di design della struttura centralizzata manifatturiera:** con l'introduzione della tecnologia AM, la struttura della SC tradizionale cambia a favore di una struttura AM centralizzata, o di una struttura AM decentralizzata. A livello qualitativo, queste tipologie di struttura suggeriscono una diminuzione della complessità della SC, con l'eliminazione di operazioni all'interno della SC (fase di lavorazione del semi-lavorato ed assemblaggio) e con la possibilità di decentralizzare la produzione vicino al retailer, senza andare ad aumentare la complessità della catena grazie alle caratteristiche digitali dell'AM. In una struttura decentralizzata l'OEM non è più il centro produttivo vero e proprio, ma è il luogo in cui vengono disegnati i vari prodotti per essere poi inviati digitalmente ai veri centri decentralizzati, spesso come visto nel capitolo 4 di proprietà di terze parti. A livello di design della SC, spariscono quelli che sono i magazzini dei prodotti finiti, poiché la produzione viene realizzata on-demand: rimangono i magazzini per le materie prime. Come trattato nel capitolo IV, esistono ulteriori possibilità di design con AM: adottare una struttura centralizzata con AM oppure adottare una struttura ad hub, a seconda delle esigenze della situazione della propria struttura.
- **Cambiamenti a livello di performance della SC:** L'AM dovrebbe permettere una maggiore facilità nell'outsourcing eliminando i possibili problemi derivanti dalla necessità di creazione e di invio dello stampo per la produzione del prodotto finito o dalla necessità di manodopera specializzata presso il sito produttivo: infatti la natura digitale dell'AM consente di abbattere i tempi di time-to-market, di ridurre i costi relativi alla produzione e di facilitare un veloce scambio di informazioni tra l'azienda produttrice centralizzata e i vari siti produttivi decentralizzati. Una SC con AM, in particolar modo quella decentralizzata, permette di essere più reattiva alla domanda e di avere dei lead time minori; inoltre permette di essere più reattiva anche a un cambiamento non

solo nella quantità, ma anche alla tipologia di domanda. All'interno di un AM service è possibile che la stessa macchina possa produrre prima un prodotto per il settore medicale e poi un ricambio per il settore automotive, senza avere i lunghi tempi di set-up per il cambio stampo tipici delle tecnologie tradizionali. La presenza di una SC decentralizzata con AM permette di limitare quelli che sono i rischi dovuti alle possibili disruption di una SC con outsourcing dove la decentralizzazione con tecnologia tradizionale porta ad una complicazione e un aumento dei rischi all'interno della catena logistica.

- **Cambiamenti nei modelli di business attuali:** l'introduzione della tecnologia AM offre la possibilità di creare nuovi modelli di business all'interno della SC, in cui attori tradizionali assumono nuovi ruoli e caratteristiche. È il caso osservato nel capitolo IV degli LSP, solitamente utilizzati per il trasporto materie prime o merci tra una stazione della SC e l'altra, che potrebbero diventare fornitori di servizi di terze parti per la produzione di prodotti AM, includendo il trasporto delle stesse. Un'altra possibilità analizzata è l'introduzione all'interno della SC degli AM service di professione che permetterebbero ai produttori di parti in AM, in particolar modo di piccole e medie dimensioni, di evitare gli alti costi fissi dovuti all'investimento iniziale in macchine. Un possibile cambiamento nel modello di business è quello relativo alla possibilità dell'utente finale di disegnarsi lui il pezzo da realizzare, anche se come analizzato ci sono ancora molti limiti dal punto di vista legislativo.
- **Impatto a livello di sostenibilità:** i cambiamenti portati dalla tecnologia AM sulla SC, come visto nel capitolo VI, possono avere anche una ricaduta dal punto di vista della sostenibilità della SC stessa. Dal punto di vista ambientale, il minor BTF ratio, la minore distanza nei trasporti dovuta a una possibile SC decentralizzata, l'eliminazione delle strutture di magazzino possono portare una diminuzione del consumo di energia e CO<sub>2</sub> all'interno della catena. Inoltre, come analizzato nel capitolo V, i vantaggi a livello di sostenibilità dati dalla produzione di un prodotto con tecnologia AM, si riscontrano anche nella fase di

utilizzo del prodotto stesso, poiché l'AM permette di creare design efficienti con risparmio di peso sul prodotto finito, che si traduce in consumi minori come in quello automotive o aerospace.

L'ampia produzione qualitativa trova in buona parte riscontro nella produzione di analisi quantitative, anche se con un numero minore di produzioni nel secondo caso: uno dei motivi sottolineati all'interno delle produzioni è la difficoltà nella quantificazione dei costi lungo tutta la SC e anche nella considerazione di tutti gli scenari che possono cambiare le performance della SC. I casi studi analizzati nel capitolo IV confermano alcuni aspetti di cambiamento della SC evidenziati nell'analisi quantitativa:

- Riduzione del SCLT per una SC con AM decentralizzata
- Miglioramento della responsiveness con AM decentralizzata
- Diminuzione dell'inventario level aggregato con AM decentralizzata
- Miglioramento in scenari di variabilità della domanda con AM decentralizzata

Inoltre il caso studio relativo al settore aerospace citato nel capitolo V, dimostra come l'introduzione della tecnologia AM vada a diminuire la complessità dell'intera catena logistica da un punto di vista di numero di magazzini, numero di processi manifatturieri: in questo caso la riduzione della complessità della catena è data dalla possibilità di fabbricare un pezzo che con tecnologia AM ha molti meno componenti poiché si può realizzare un unico pezzo integrato, portando una semplificazione lungo la SC di quel prodotto. Sembrerebbe quindi che l'impatto all'interno della SC porti ad un miglioramento totale delle performance delle SC, in particolar modo con l'adozione di una struttura decentralizzata AM che presenta in questi casi performance migliori rispetto a una struttura centralizzata. I casi studi di Khajavi e Verboeket non smentiscono queste tendenze rispetto a queste misure di performance, ma pongono l'attenzione sui costi totali dell'intera SC nei casi di tecnologia tradizionale, centralizzata con AM e decentralizzata con AM; dai loro casi studio emerge come i costi totali della catena con le tecnologie attuali sono ancora maggiori per una struttura AM decentralizzata, a causa dell'investimento in macchine e soprattutto ai costi di

gestione delle macchine stesse. Infatti le macchine attuali hanno ancora un tempo di riscaldamento troppo lento, con un elevato consumo di energia che non permette di compensare il risparmio dato dai minori livelli di magazzino, dal minor costo di trasporto e dalla minore penalità dovuta ai minori ritardi; una struttura centralizzata AM non ha gli stessi vantaggi a livello di performance, ma permette, avendo tutte le macchine situate nello stesso loco, di ammortizzare i costi energetici di riscaldamento delle macchine, vero problema dell'attuale tecnologia AM. Nei vari scenari esplorati da questi casi studio si osserva come ipotizzando di impiegare delle macchine ideali, con tempi di riscaldamento brevi si arrivi ad uno scenario in cui la tecnologia AM decentralizzata garantisca un costo lungo la SC inferiore rispetto a uno scenario AM centralizzato e ad uno scenario centralizzato tradizionale. I costi analizzati per i vari casi studi ed applicazioni per ogni settore confermano questa situazione, con alcune applicazioni (realizzazioni di stampi per il settore energetico e prototipazione rapida per settore automotive) dove si riscontrano dei vantaggi anche a livello economico, ma con altre situazioni (realizzazione di scarpe ortopediche per settore medico, ricambi per settore automotive) in cui i vantaggi a livello economico per l'AM non si riscontrano, se non in alcune tipologie di scenario: impiego FDM per ricambi o futura evoluzione tecnologia AM per scarpe ortopediche. Questo si attesta come uno dei principali limiti al momento per l'affermazione della tecnologia AM lungo la catena logistica, nonostante tutti i vantaggi a livello di performance della SC evidenziati precedentemente: il costo delle macchine rispetto a una tecnologia tradizionale è ancora elevato e la tecnologia richiede dei costi di funzionamento eccessivamente impattanti per garantire un miglior profitto per la catena logistica. Un problema ulteriore relativo alla diffusione della tecnologia AM è che questi alti investimenti iniziali nei macchinari, permettono solo a una ristretta cerchia di aziende di grosse dimensioni di investire in ricerca e macchinari; per una maggiore diffusione di questa tecnologia e di conseguenza un maggiore impatto di essa sulla SC è auspicabile che le prospettive di crescita descritte nel capitolo III legate al settore AM, si confermino veritiere e portino ad una diminuzione del costo dei macchinari e in particolar modo ad

un miglioramento della tecnologia per abbattere i costi di produzione; gli investimenti citati nel capitolo V testimoniano le possibilità e la voglia di crescita del settore, ma anche il fatto, come detto precedentemente, che siano effettuati solamente da aziende di grandi dimensioni o dalle produttrici di macchine stesse, lasciando escluse le piccole medie imprese. Per il momento una soluzione per le piccole medie imprese che si affacciano sul mercato dell'AM per rafforzare la proprio SC, potrebbe essere quella di rivolgersi ad un AM service per la realizzazione dei prodotti: gli AM service a differenza di queste piccole aziende, riuscendo a ricevere le commesse da più aziende in loco le quali riescono a tenere sempre in funzione le macchine abbattendo quelli che sono i costi di riscaldamento del sistema e spalmando i costi di gestione su un numero maggiore di prodotti, garantendosi così costi inferiori.

Al momento come visto nel capitolo V, la produzione di massa non è ancora diffusa in maniera omogenea all'interno di tutti settori e varia molto a seconda dei prodotti realizzati: in un settore come quello medico-dentale riesce a garantire alti tassi di produzione con un alto tasso di personalizzazione del prodotto, mentre in settori come quello automotive la sua applicazione nella produzione di massa è ancora bloccata e necessiterà di un ulteriore velocizzazione dei tempi di lavorazione delle macchine per i componenti di questo settore.

L'AM riesce ad affermare tutte le sue potenzialità al momento nell'ambito del prototyping, in cui l'AM è nata come tecnologia. Il caso studio di Zanoni sul settore automotive e l'esempio della realizzazione dello stampo nel settore energetico permettono di capire quelle che sono le potenzialità dell'AM nella parte di time-to-market del prodotto con una riduzione drastica del lead time di produzione del prototipo definitivo e un significativo risparmio a livello di costi; oltretutto garantiscono una maggior complessità del pezzo realizzato e un minor peso del pezzo finale che verrà poi realizzato nel caso dello stampo con l'utilizzo di geometrie più efficienti, possibile con una tecnologia AM. L'impatto a livello di sostenibilità lungo la catena è confermato dai lavori quantitativi analizzati nel capitolo VI dove si riscontra come il minor BTF garantito dall'impiego di una tecnologia AM, porti a una

significativa riduzione nell'utilizzo delle materie prime, spesso materie prime rare come ad esempio il titanio; inoltre la voce che subisce una maggior riduzione a livello di consumo energetico è proprio quella relativa alle materie prime, con minor energia spesa nell'estrazione rispetto alla voce trasporto che ha una riduzione, ma non così significativa. A livello qualitativo, si possono riassumere gli effetti descritti dell'introduzione dell'AM nei vari settori presi in considerazione nel capitolo V nella tabella 6 qui riportata: la freccia in alto indica un aumento della caratteristica presa in considerazione rispetto all'impiego di una tecnologia tradizionale nello stesso settore, la freccia in basso indica una riduzione della caratteristica, il simbolo uguale indica che non è possibile stabilire se ci sia un aumento o una diminuzione, mentre la doppia freccia sta ad indicare un aumento o una diminuzione molto significativa.

	<b>Risorse</b>	<b>Lead time</b>	<b>Costi</b>	<b>Mass production</b>	<b>Investimenti</b>
<b>Automotive</b>	↓↓	↓	↑	↓	↑
<b>Medical</b>	↓	↓↓	=	↑↑	↑↑
<b>Aerospace</b>	↓↓	↓	=	=	↑↑
<b>Energetico</b>	↓	↓	↓	↑	↑

*Tabella 6: confronto effetti tra settori*

I confini dello sviluppo dell'AM non si ferma ai settori analizzati nel capitolo V, ma sono ancora tutti da scoprire e in alcuni casi si sono già evidenziati in applicazioni specifiche come citato per il settore food e il settore construction: in quest'ultimo la novità rispetto agli altri settori analizzati negli altri capitoli, potrebbe essere quella di riuscire a produrre prodotti finali di grandi dimensioni, limite che si è manifestato nella tecnologia dall'inizio della sua introduzione.

Pertanto, l'analisi effettuata permette di dire che al momento l'AM, dato il crescente interesse nella tecnologia e il suo impiego durante gli anni della pandemia, presenta numerose potenzialità di cambiamento della SC, con possibili miglioramenti a livello di performance e anche alcune criticità irrisolte descritte a livello qualitativo. Parte di

queste aspettative trovano riscontro nella letteratura quantitativa su determinate misure di performance, ma su altre (tema dei costi) evidenziano alcune fragilità nella diffusione di questa tecnologia al momento all'interno della SC, che rendono il suo sviluppo all'interno del tessuto manifatturiero ancora limitato e poco organizzato, nonostante le prospettive future siano quelle di un settore in crescita, con investimenti già avviati da parte di alcune grandi aziende. Anche nei settori di nuova applicazione (food e construction), le problematiche legate alla mancanza di manodopera qualificata, assenza di standard ben definiti, costo di utilizzo delle macchine rallentano la diffusione di innovazioni che soprattutto nel caso del settore construction avrebbero un enorme impatto sulla SC di quel settore sia lato cliente che lato produttore. Le potenzialità dell'AM sulla SC a livello quantitativo potranno essere quindi scoperte a pieno negli anni futuri, quando la prospettata crescita del settore, dovrebbe garantire un minor costo delle macchine e ad un miglioramento della tecnologia relativa alla produzione, permettendo così una maggiore diffusione a livello aziendale e la possibilità di una maggiore analisi quantitativa sull'impatto economico di questa tecnologia all'interno della SC.

# Bibliografia

- Sweeney, E., Grant, D.B. and Mangan, D.J. (2018), "Strategic adoption of logistics and supply chain management", *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 38 No. 3, pp. 852-873.
- Zhang, G., Yang, Y. & Yang, G. Smart supply chain management in Industry 4.0: the review, research agenda and strategies in North America. *Ann Oper Res* 322, 1075–1117 (2023).
- <https://www.investopedia.com/terms/s/scm.asp#:~:text=The%20five%20most%20critical%20phases, costs%20and%20a voiding%20supply%20shortages.>
- <https://www.toolshero.com/marketing/pricing-strategy-matrix/>
- Angkiriwang, R., Pujawan, I. N., & Santosa, B. (2014). Managing uncertainty through supply chain flexibility: reactive vs. proactive approaches. *Production & Manufacturing Research*, 2(1), 50–70.
- Tom Vaneker, Alain Bernard, Giovanni Moroni, Ian Gibson, Yicha Zhang, Design for additive manufacturing: Framework and methodology, *CIRP Annals*, Volume 69, Issue 2, 2020, Pages 578-599
- Sunpreet Singh, Seeram Ramakrishna, Rupinder Singh, Material issues in additive manufacturing: A review, *Journal of Manufacturing Processes*, Volume 25, 2017, Pages 185-200,
- Schmid, M., Amado, A. & Wegener, K. Materials perspective of polymers for additive manufacturing with selective laser sintering. *Journal of Materials Research* 29, 1824–1832 (2014).
- Gokuldoss, P.K.; Kolla, S.; Eckert, J. Additive Manufacturing Processes: Selective Laser Melting, Electron Beam Melting and Binder Jetting—Selection Guidelines. *Materials* 2017, 10, 672.
- Huang, J.; Qin, Q.; Wang, J. A Review of Stereolithography: Processes and Systems. *Processes* 2020, 8, 1138.
- Chaudhary, R., Fabbri, P., Leoni, E. et al. Additive manufacturing by digital light processing: a review. *Prog Addit Manuf* 8, 331–351 (2023).
- Patpatiya P, Chaudhary K, Shastri A, Sharma S. A review on polyjet 3D printing of polymers and multi-material structures. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2022;236(14):7899-7926.
- Tagliaferri V, Trovalusci F, Guarino S, Venettacci S. Environmental and Economic Analysis of FDM, SLS and MJF Additive Manufacturing Technologies. *Materials (Basel)*. 2019 Dec 11;12(24)
- Marco Simonelli, Nesma Aboulkhair, Mircea Rasa, Mark East, Chris Tuck, Ricky Wildman, Otto Salomons, Richard Hague, Towards digital metal additive manufacturing via high-temperature drop-on-demand jetting, *Additive Manufacturing*, Volume 30, 2019,
- Gordelier, T.J., Thies, P.R., Turner, L. and Johanning, L. (2019), "Optimising the FDM additive manufacturing process to achieve maximum tensile strength: a state-of-the-art review", *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 25 No. 6, pp. 953-971
- David Svetlizky, Mitun Das, Baolong Zheng, Alexandra L. Vyatskikh, Susmita Bose, Amit Bandyopadhyay, Julie M. Schoenung, Enrique J. Lavernia, Noam Eliaz, Directed energy deposition (DED) additive manufacturing: Physical characteristics, defects, challenges and applications, *Materials Today*, Volume 49, 2021,
- P. K. Schaefermeier, D. Szymanski, F. Weiss et al., "Design and fabrication of three-dimensional scaffolds for tissue engineering of human heart valves," *European Surgical Research*, vol. 42, no. 1, pp. 49–53, 2008
- S. Baumgartner, R. Gmeiner, J. A. Schönherr, and J. Stampfl, "Stereolithography-based additive manufacturing of lithium disilicate glass ceramic for dental applications," *Materials Science and Engineering: C*, vol. 116, Article ID 111180, 2020.
- J. Long, H. Gholizadeh, J. Lu, C. Bunt, and A. Seyfoddin, "Application of fused deposition modelling (FDM) method of 3D printing in drug delivery," *Current Pharmaceutical Design*, vol. 23, no. 3, pp. 433–439, 2017.
- P. Kumar, I. Ahuja, and R. Singh, "Application of fusion deposition modelling for rapid investment casting—a review," *International Journal of Materials Engineering Innovation*, vol. 3, pp. 204–227, 2012.
- G. Liu, X. Zhang, X. Chen et al., "Additive manufacturing of structural materials," *Materials Science and Engineering: R: Reports*, vol. 145, Article ID 100596, 2021.

- J. Kaspar, S. Bechtel, T. Häfele et al., "Integrated additive product development for multi-material parts," *Procedia Manufacturing*, vol. 33, pp. 3–10, 2019.
- Y. Balit, L.-R. Joly, F. Szmytka, S. Durbecq, E. Charkaluk, and A. Constantinescu, "Self-heating behavior during cyclic loadings of 316L stainless steel specimens manufactured or repaired by Directed Energy Deposition," *Materials Science and Engineering A*, vol. 786, Article ID 139476, 2020
- J. Bennett, D. Garcia, M. Kendrick et al., "Repairing automotive dies with directed energy deposition: industrial application and life cycle analysis," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 141, no. 2, Article ID 021019, 2019.
- S. S. Dimov, D. T. Pham, F. Lacan, and K. Dotchev, "Rapid tooling applications of the selective laser sintering process," *Assembly Automation*, vol. 21, no. 4, pp. 296–302, 2001.
- J. M. Williams, A. Adewunmi, R. M. Schek et al., "Bone tissue engineering using polycaprolactone scaffolds fabricated via selective laser sintering," *Biomaterials*, vol. 26, no. 23, pp. 4817–4827, 2005.
- S. J. Trenfield, C. M. Madla, A. W. Basit, and S. Gaisford, "Binder jet printing in pharmaceutical manufacturing," *3D Printing of Pharmaceuticals*, pp. 41–54, 2018.
- Additive Manufacturing and Material Market Size & Sales 2032 ([futuremarketinsights.com](https://www.futuremarketinsights.com))
- Technical Considerations for Additive Manufactured Medical Devices - Guidance for Industry and Food and Drug Administration Staff ([fda.gov](https://www.fda.gov))
- Additive Manufacturing Market Size 2023, Forecast By 2032 ([reportsanddata.com](https://www.reportsanddata.com))
- Asia Pacific Additive Manufacturing (AM) Market was valued ([globenewswire.com](https://www.globenewswire.com))
- Europe Additive Manufacturing Market Share & Analysis | 2023-2030 ([nextmsc.com](https://www.nextmsc.com))
- <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/additive-manufacturing-market>
- <https://www.agendadigitale.eu/industry-4-0/integradde-ecco-il-progetto-ue-sulladditive-manufacturing-obiettivi-e-prospettive/>
- <https://www.precedenceresearch.com/healthcare-additive-manufacturing-market>
- <https://wohlersassociates.com/news/wohlers-report-2023-unveils-continued-double-digit-growth/>
- <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/the-mainstreaming-of-additive-manufacturing>
- <https://www.mckinsey.com/capabilities/growth-marketing-and-sales/our-insights/the-value-of-getting-personalization-right-or-wrong-is-multiplying>
- Stampa 3D, Italia seconda in Europa per applicazioni industriali e sesta per brevetti - Innovation Post
- Hu, S. J. (2013). Evolving paradigms of manufacturing: From mass production to mass customization and personalization. 46th CIRP Conference on Manufacturing Systems 2013, 29–30 May 2013, Setubal, Portugal
- Laplume, A. O., Petersen, B., & Pearce, J. M. (2016). Global value chains from a 3D printing perspective. *Journal of International Business Studies*, 47(5), 595–609.
- Ashby, A. (2016). From global to local: Reshoring for sustainability. *Operations Management Research*, 9(3–4), 75–88
- Buckley, P. J., & Strange, R. (2015). The governance of the global factory: Location and control of world economic activity. *Academy of Management Perspectives*, 29(2), 237–249.
- Farooque, M., Zhang, A., Thüerer, M., Qu, T., & Huisinigh, D. (2019). Circular supply chain management: A definition and structured literature review. *Journal of Cleaner Production*, 228, 882–900
- Sasson, A., & Johnson, J. C. (2016). The 3D printing order: Variability, supercenters and supply chain reconfigurations. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 46(1), 82–94
- Tate, W. L., Ellram, L. M., Schoenherr, T., & Petersen, K. J. (2014). Global competitive conditions driving the manufacturing location decision. *Business Horizons*, 57(3), 381–390. A. Busachi, J. Erkoyuncu, P. Colegrove, F. Martina, C. Watts, R. Drake A review of Additive Manufacturing technology and Cost Estimation techniques for the defence sector CIRP J. Manuf. Sci. Technol. (2017)

- C. Weller, R. Kleer, F.T. Piller Economic implications of 3D printing: Market structure models in light of additive manufacturing revisited *Int. J. Prod. Econ.* (2015)
- A. Ghobadian, I. Talavera, A. Bhattacharya, V. Kumar, J.A. Garza-Reyes, N. O'Regan Examining legitimatisation of additive manufacturing in the interplay between innovation, lean manufacturing and sustainability *Int. J. Prod. Econ.* (2020)
- Verboeket V, Krikke H. The disruptive impact of additive manufacturing on supply chains: A literature study, conceptual framework and research agenda. *Computers in Industry.* 2019;111:91-107
- Rylands, B., Böhme, T., Gorkin, R., Fan, J., & Birtchnell, T. (2016). The adoption process and impact of additive manufacturing on manufacturing systems. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 27(7), 969–989
- Zijm, H., Knofius, N., & van der Heijden, M. (2019). Additive manufacturing and its impact on the supply chain. In Zijm, H., Klumpp, M., Regattieri, A., & Heragu, S. (Eds.), *Operations, logistics and supply chain management* (pp. 521–543)
- D.R. Evers, A.T. Potter E-commerce channels for additive manufacturing: An exploratory study *J. Manuf. Technol. Manag.* (2015)
- Baumers, M., Dickens, P., Tuck, C., & Hague, R. (2016). The cost of additive manufacturing: Machine productivity, economies of scale and technology-push. *Technological Forecasting and Social Change*, 102, 193–201
- B. Berman 3-D printing: The new industrial revolution *Bus. Horiz.* (2012)
- Srai, J. S., Harrington, T. S., & Tiwari, M. K. (2016a). Characteristics of redistributed manufacturing systems: A comparative study of emerging industry supply networks. *International Journal of Production Research*, 54(23), 6936–6955
- Li, Y., Jia, G., Cheng, Y., & Hu, Y. (2017b). Additive manufacturing technology in spare parts supply chain: A comparative study. *International Journal of Production Research*, 55(5), 1498–1515
- Öberg, C. (2019). Additive manufacturing – digitally changing the global business landscape. *European Journal of Management and Business Economics*, 28(2), 174–188 498–1515
- Wang, Y., Lin, Y., Zhong, R. Y., & Xu, X. (2019). IoT-enabled cloud-based additive manufacturing platform to support rapid product development. *International Journal of Production Research*, 57(12), 3975–3991.
- M. Cotteleer 3D opportunity for production: Additive Manufacturing makes its business case *Deloitte Rev.* (2014)
- K. Oettmeier, E. Hofmann Impact of additive manufacturing technology adoption on supply chain management processes and components *J. Manuf. Technol. Manag.* (2016)
- Mathauer, M., & Hofmann, E. (2019). Technology adoption by logistics service providers. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 49(4), 416–434.
- Pause, D., & Marek, S. (2019). Supply chain scenarios for logistics service providers in the context of additive spare parts manufacturing. *IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems (APMS 2019)*, 1–5 September 2019, Austin, USA
- de la Peña Zarzuelo, I., Freire Soeane, M. J., & López Bermúdez, B. (2020). Industry 4.0 in the port and maritime industry: A literature review. *Journal of Industrial Information Integration*, 20, Article 100173
- Supply chain design for industrial additive manufacturing ,Anne Friedrich, Anne Lange, Ralf Elbert *International Journal of Operations & Production Management*,
- Additive Manufacturing-Based Supply Chain Configurations written by Silvana Gallinaro (2023) DOI: 10.5772/intechopen.110174
- <https://www.deloitte.com/global/en/our-thinking/insights/industry/manufacturing-industrial-products/realigning-global-supply-chain-management-networks1.html>
- “Additive Manufacturing for Localized Medical Parts Production: A Case Study” Victor Verboeket; Siavash H. Khajavi; Harold Krikke; Mika Salmi; Jan Holmström

“Business models and supply chain of personalized medical products made by additive manufacturing” Mika Salmi et al

“3D Printing in COVID-19: Productivity Estimation of the Most Promising Open Source Solutions in Emergency Situations” Mika Salmi 1,\* , Jan Sher Akmal 1 , Eujin Pei 2 , Jan Wolff 3,4, Alireza Jaribion 5 and Siavash H. Khajavi 5

<https://formlabs.com/covid-19-response/covid-test-swabs/>

“Supply chain implications of additive manufacturing: a holistic synopsis through a collection of case studies” Simone Zanoni & Milad Ashourpour & Andrea Bacchetti & Massimo Zanardini & Marco Perona

“Additive Manufacturing in Automobile Industry” Shruti Ganesh Sarvankar , Sanket Nandaram Yewale

Additive Manufacturing Will Change Procurement as You Know It”, Supply & Demand Chain (SDC) Executive Magazine, 19 April 2020 Uffhausen

“Pilot Study Procurement 4.0. The Digitalization of Procurement”, Fraunhofer Institute for Material Flow and Logistics Pellengahr, K., A. Schulte, J. Richard, and M. Berg (2018)

Ribeiro, I.; Matos, F.; Jacinto, C.; Salman, H.; Cardeal, G.; Carvalho, H.; Godina, R.; Peças, P. Framework for life cycle sustainability assessment of additive manufacturing. *Sustainability* 2020, 12, 929

“Additive Manufacturing for 3D Printing using OEM in Automobile Industry” 1Dr. C. Dhandapani, 2G. Vanishree

“Business Impact of the Coronavirus Business and Supply Chain Analysis Due to the Coronavirus Outbreak” Dun&Bradstreet

Wimpenny D.I., Pandey P.M., Kumar J.L. *Advances in 3D Printing, Additive Manufacturing Technologies*, pp.39-53. Springer, Singapur DOI 10.1007/978-981-10-0812-2, 2017.

<https://www.ge.com/news/reports/future-manufacturing-take-look-inside-factory-3d-printing-jet-engine-parts>

<https://www.airbus.com/en/newsroom/news/2016-03-pioneering-bionic-3d-printing>.

<http://globalprintmonitor.de/en/3d/3d-printing-news/aerospace/17617-additive-manufacturing-reduces-tooling-cost-and-lead-time-to-produce-composite-aerospace-parts>

Kalender, M.; Kilic, S.E.; Ersoy, S.; Bozkurt, Y.; Salman, S. Additive Manufacturing and 3D Printer Technology in Aerospace Industry. In *Proceedings of the 2019 9th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST)*, Istanbul, Turkey, 11–14 June 2019; pp. 689–695.

Amirkolaii, K.N.; Baboli, A.; Shahzad, M.K.; Tonadre, R. Demand Forecasting for Irregular Demands in Business Aircraft Spare Parts Supply Chains by Using Artificial Intelligence (AI). *IFAC-PapersOnLine* 2017, 50, 15221–15226

Simeone, A.; Caggiano, A.; Zeng, Y. Smart Cloud Manufacturing Platform for Resource Efficiency Improvement of Additive Manufacturing Services. In *Procedia CIRP*; Elsevier B.V.: Amsterdam, The Netherlands, 2020; Volume 88, pp. 387–392.

Stock, T.; Seliger, G. Opportunities of Sustainable Manufacturing in Industry 4.0. *Procedia CIRP* 2016, 40, 536–541

Fisher, O.; Watson, N.; Porcu, L.; Bacon, D.; Rigley, M.; Gomes, R.L. Cloud Manufacturing as a Sustainable Process Manufacturing Route. *J. Manuf. Syst.* 2018, 47, 53–68

Majeed, A.; Lv, J.; Peng, T. A Framework for Big Data Driven Process Analysis and Optimization for Additive Manufacturing. *Rapid Prototyp. J.* 2019, 25, 308–321.

Gisario, A.; Kazarian, M.; Martina, F.; Mehrpouya, M. Metal Additive Manufacturing in the Commercial Aviation Industry: A Review. *J. Manuf. Syst.* 2019, 53

Knofius, N., van der Heijden, M.C. and Zijm, W.H.M. (2016), "Selecting parts for additive manufacturing in service logistics", *Journal of Manufacturing Technology Management*, Vol. 27 No. 7, pp. 915-931

Haghighat Khajavi, Siavash, et al. "Impact of additive manufacturing on supply chain complexity." (2020).

"Impacts of Additive Manufacturing on Supply Chain Flow: A Simulation Approach in Healthcare Industry" Eren Özceylan, Cihan Çetinkaya, Neslihan Demirel and Ozan Sabirlio ğlu

:AhlSELL, L.; Jalal, D.; Khajavi, S.H.; Jonsson, P.; Holmström, J. "Additive Manufacturing of Slow-Moving Automotive Spare Parts: A Supply Chain Cost Assessment" . *J. Manuf. Mater. Process.* 2023, 7, 8.

Verboeket, V.; Krikke, H.; Salmi, M. Implementing Additive Manufacturing in Orthopedic Shoe Supply Chains—Cost and Lead Time Comparison. *Logistics* 2024, 8, 49

"On the impact of direct digital manufacturing on supply chain operations, cost and environmental performance in an aerospace application" (2018) Matthias Heppa

Kurdve, M., Persson, K., Widfeldt, M. et al (2020). Lead-Time Effect Comparison of Additive Manufacturing with Conventional Alternatives. *Advances in Transdisciplinary Engineering*, 13: 672-679.

"Innovating the Supply Chain of Wind Energy Through the Application of Additive Manufacturing" (2017) Brett C. Kraynyk Daniel W. Janzen

Porsche invests in 3D printing specialist INTAMSYS - Porsche Newsroom

GE Aerospace to invest over \$650M in manufacturing facilities and supply chain (metal-am.com)

4 Top Additive Manufacturing Startups Impacting The Energy Industry (startus-insights.com)

<https://markforged.com/it/resources/case-studies/vestas>

<https://sn.astm.org/node/3486/printable/print>

Garetti, M.; Taisch, M. Sustainable manufacturing: Trends and research challenges. *Prod. Plan. Control* 2012, 23, 83–104

Jingchao Jiang, Yi Xiong, Zhiyuan Zhang, David Rosen, "Machine learning integrated design for additive manufacturing", *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2020.

Ribeiro, Inês, Florinda Matos, Celeste Jacinto, Hafiz Salman, Gonçalo Cardeal, Helena Carvalho, Radu Godina, and Paulo Peças. 2020. "Framework for Life Cycle Sustainability Assessment of Additive Manufacturing" *Sustainability* 12, no. 3: 929.

"Improving sustainability and cost efficiency for spare part allocation strategies by utilisation of additive manufacturing technologies", K. Ott, H. Pascher, W. Sihn, *Proc. Manuf.*, 33 (2019 Jan 1), pp. 123-130

"A deep look at metal additive manufacturing recycling and use tools for sustainability performance" A.E. OrosDaraban, C.S. Negrea, F.G. Artimon, D. Angelescu, G. Popan, S.I. Gheorghe, M. Gheorghe, *Sustainability*, 11 (19) (2019 Jan), p. 5494

"Additive manufacturing as a driver for the sustainability of short-lifecycle customised products: the case study of mobile case covers" P. Minetola, D.R. Eysers *Int. Conf. Sustain. Des. Manuf.* (2017 Apr 26), pp. 766-775

"LCA of plastic waste recovery into recycled materials, energy and fuels in Singapore" H. Khoo *Resour Conserv Recycl*, 145 (2019), pp. 67-77

"The guide to glass 3D printing: developments, methods, diagnostics and results" G. Marchelli, R. Prabhakar, D. Storti, M. Ganter *Rapid Prototyp J*, 17 (2011), pp. 187-194

“Reinforcement of cement mortars with additively manufactured fibers in recycled nylon” I. Farina, R. Cioffi, F. Fabbrocino, P. Russo, F. Fraternali AIMETA 2017 – proc. 23rd conf Ital assoc theor appl mech (2017), pp. 2038-2046

“Is 3D printing safe? Analysis of the thermal treatment of thermoplastics: ABS, PLA, PET, and nylon” S. Wojtyła, P. Klama, T. Baran J Occup Environ Hyg, 14 (2017), pp. D80-D85,

“The impact of manufacturing parameters on submicron particle emissions from a desktop 3D printer in the perspective of emission reduction” Y. Deng, S.J. Cao, A. Chen, Y. Guo BuildEnviron, 104 (2016), pp. 311-319,

“Impact of strategic control and supply chain management on recycled plastic additive manufacturing” Haishang Wu, Hamid Mehrabi, Nida Naveed, Panagiotis Karagiannidis Journal of Cleaner Production, Volume 364, 1 September 2022, 132511

“Main-chain scission of individual macromolecules induced by solvent swelling” D. Messmer Chem. Sci., 10 (2019), p. 6125

Interview with UPS: How Will 3D Printing Impact the Supply Chain? J. Michelle

“Impact of additive manufacturing on titanium supply chain: Case of titanium alloys in automotive and aerospace industries” Patricia Nyamekye , Saeed Rahimpour Golroudbary , Heidi Piili , Pasi Luukka , Andrzej Kraslawski , Advances in Industrial and Manufacturing Engineering Volume 6, May

<https://tech.hyundaimotorgroup.com/article/hyundai-and-kias-automotive-lightweight-technology-development/> (2019)023, 100112

<https://www.energy.gov/eere/vehicles/lightweight-materials-cars-and-trucks>

<https://www.additive-x.com/blog/how-airbus-is-using-3d-printing-to-reduce-aircraft-emissions/> (2019)

R. Huang, M. Riddle, D. Graziano, J. Warren, S. Das, S. Nimbalkar, J. Cresko, E. Masanet “Energy and emissions saving potential of additive manufacturing: the case of lightweight aircraft components” J. Clean. Prod., 135 (2016), pp. 1559-157

S.R. Golroudbary, J. Farfan, A. Lohrmann, A. Kraslawski “Environmental benefits of circular economy approach to use of cobalt” Global Environ. Change, 76 (2022), Article 102568,

Z.Y. Liu, C. Li, X.Y. Fang, Y.B. Guo “Energy consumption in additive manufacturing of metal parts Procedia Manufacturing”, Elsevier B.V. (2018), pp. 834-845

R. Harkin, H. Wu, S. Nikam, J. Quinn, S. McFadden “Reuse of grade 23 ti6al4v powder during the laser-based powder bed fusion processMetals”, 10 (2020), pp. 1-14

Yao Li, Guozhu Jia, Yang Cheng & Yuchen Hu (2016): “Additive manufacturing technology in spare parts supply chain: a comparative study”, International Journal of Production Research

“Additive manufacturing of steel for digital spare parts – A perspective on carbon emissions for decentral production” Mario Rupp , Manuel Buck , René Klink , Markus Merkel , David K. Harrison Cleaner Environmental Systems Volume 4, March 2022, 100069

Ramani Ayyagari, Qian Chen, Borja García de Soto, “Quantifying the impact of concrete 3D printing on the construction supply chain”, Automation in Construction, Volume 155, 2023