



**Politecnico  
di Torino**

# Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in  
Ingegneria Gestionale

## **Gli effetti delle tecnologie additive e tradizionali nella green supply chain**

Relatori:

Prof.ssa Calignano Flavia

Prof. Iuliano Luca

Candidato:

Fabio Di Mauro

A.a. 2021/2022

# INDICE

1. INTRODUZIONE.....	3
2. SOSTENIBILITÀ DELLA PRODUZIONE ADDITIVA .....	6
2.1 IMPLICAZIONI DI SOSTENIBILITÀ.....	7
2.2 PRODUZIONE ADDITIVA IN UN'ECONOMIA CIRCOLARE .....	10
2.3 STATO DELL'ARTE.....	11
2.4 CONSUMO ENERGETICO .....	12
3. ECONOMICITÀ DELLA PRODUZIONE ADDITIVA.....	17
3.1 MODELLI ECONOMICI DELLE OPERAZIONI DI PRODUZIONE ADDITIVA.....	18
3.2 SOSTENIBILITÀ ECONOMICA NELLE INDUSTRIE DI PROCESSO PER LE ATTIVITÀ DI MANUTENZIONE NELLA CATENA DI APPROVVIGIONAMENTO....	20
4. BARRIERE ALLA DIFFUSIONE DELLA PRODUZIONE ADDITIVA .....	25
4.1 ANALISI E CRITICITÀ DEL CICLO DI VITA DELLA PRODUZIONE ADDITIVA	27
4.2 PANORAMICA DELLE BARRIERE ALLA DIFFUSIONE.....	32
5. CONFRONTO TRA LE FILIERE ADDITIVE E TRADIZIONALI.....	34
5.1 CONFIGURAZIONI DELLA SUPPLY CHAIN .....	36
5.2 TECNOLOGIE A CONFRONTO: VOLUME E COMPLESSITÀ .....	40
5.3 EFFETTI SULLA GREEN SUPPLY CHAIN.....	41
6. IMPLEMENTAZIONE E METODI DI APPROVVIGIONAMENTO DELLA PRODUZIONE ADDITIVA NELLE SUPPLY CHAIN.....	44
6.1 IMPATTO DELLA PRODUZIONE ADDITIVA SUI METODI DI GESTIONE DELLA SUPPLY CHAIN .....	46
6.2 PROGETTAZIONE DEL PRODOTTO ADDITIVO PER UN USO INDUSTRIALE ...	48
6.3 INFLUENZA DELLA DIFFUSIONE ADDITIVA SUL PROCESSO DELLA SUPPLY CHAIN .....	50
7. PRODUZIONE ADDITIVA SU LARGA SCALA .....	54
7.1 CARATTERISTICHE RICHIESTE PER L'ADOZIONE SU LARGA SCALA .....	56

8. PROCESSI DI PRODUZIONE IBRIDI .....	60
9. PROBLEMATICHE DELLA SUPPLY CHAIN E BENEFICI DERIVANTI DALL'IMPLEMENTAZIONE DELLA PRODUZIONE ADDITIVA.....	64
9.1 DISCUSSIONE.....	66
10. AVANZAMENTI ATTUALI DELLA PRODUZIONE ADDITIVA .....	72
10.1 RUOLO DELLA PRODUZIONE ADDITIVA DURANTE E POST COVID-19 .....	74
11. CONCLUSIONI.....	76
12. BIBLIOGRAFIA.....	78
13. SITOGRAFIA .....	80

# 1. INTRODUZIONE

La produzione additiva è una tecnologia chiave dell'Industria 4.0 per la produzione di prodotti altamente personalizzabili riducendo i costi rispetto alle tecnologie tradizionali. Soprattutto le piccole e medie imprese spesso non hanno la competenza e l'esperienza per valutare in modo obiettivo e profondo il potenziale delle tecnologie di produzione additiva.

Questo lavoro di tesi si è focalizzato sulle potenzialità della produzione additiva, analizzando i suoi vantaggi e criticità, nonché l'implementazione nella supply chain verranno analizzati dando grande rilevanza all'impatto che l'integrazione di queste tecnologie ha a livello economico, sociale ed ambientale.

La produzione additiva è nata alla fine degli anni 80 per sviluppare prodotti in materiale polimerico.

Con il termine di additive manufacturing (AM) o produzione additiva, si intende la possibilità di realizzare, mediante tecnologia di costruzione per strati, la produzione di componenti definitivi, nel materiale finale e direttamente dal modello matematico realizzato al CAD tridimensionale, senza l'impiego di utensili e attrezzature.

La figura 1 riporta una mappa temporale con le tappe fondamentali dell'evoluzione della produzione additiva [1].



Figura 1 – Mappa temporale della produzione additiva

Il punto chiave di questa tecnologia è rappresentato dall'eliminazione dalla principale rigidità presente nelle attuali produzioni dei beni di largo consumo: gli stampi, che hanno vincoli sul design.

Le attrezzature di produzione tradizionale determinano infatti una serie di vincoli sia sul design che sul progetto del prodotto e superare questi limiti nella produzione additiva libera di conseguenza l'immagine del designer.

Occorre comunque considerare che i maggiori vantaggi possono essere conseguiti solamente se il prodotto viene progettato tenendo conto che verrà realizzato con la produzione additiva: utilizzare la produzione additiva per un prodotto pensato per essere realizzato con gli stampi è l'errore più grave che possa essere commesso, in quanto ogni prodotto deve essere sviluppato tenendo conto del processo produttivo.

Non occorre ovviamente sottolineare l'importanza che questa attività rappresenta per le aziende produttrici di beni di largo consumo, in termini di riduzione del time to market.

Con la recente comparsa della produzione additiva per applicazioni di produzione per uso finale, la letteratura sulla gestione di questa tecnologia contemporanea suggerisce trasformazioni strutturali radicali alle strutture della catena di approvvigionamento con corrispondenti vantaggi in termini di prestazioni, rispetto alla produzione tradizionale.

Il mio elaborato analizza i potenziali impatti dei processi della produzione additiva sulle strutture della supply chain tradizionale.

Viene sviluppata un'analisi per catturare questi impatti con le relative implicazioni per le operazioni dei fornitori di parti, dei fornitori di moduli e degli assemblatori finali, implementando la produzione additiva in diverse modalità e livelli nella gerarchia del prodotto.

Evidenziando le differenze nelle caratteristiche della supply chain rispetto agli scenari di produzione additiva e tradizionale, l'analisi aiuta a concettualizzare e spiegare i potenziali impatti della produzione additiva sulle configurazioni della catena di approvvigionamento.

Questa differenziazione è necessaria per comprendere le capacità relative delle configurazioni tradizionali e additive e le implicazioni per le diverse entità della supply chain.

I potenziali impatti della produzione additiva sulle caratteristiche strutturali del supply chain sono analizzati utilizzando la teoria della configurazione, ovvero si evidenzieranno le differenze nelle caratteristiche delle catene di approvvigionamento in base a scenari di produzione tradizionali, additivi ed ibridi.

La produzione additiva è una tecnologia di produzione che usa un approccio completamente diverso dal tradizionale approccio sottrattivo.

A causa della sua diversa natura, la sua applicazione potrebbe causare forti cambiamenti nelle catene di approvvigionamento e potrebbe influenzare il rapporto tra gli attori della filiera.

Infatti, si propone una valutazione quantitativa degli effetti della produzione additiva sulle prestazioni della catena di fornitura, considerando diverse configurazioni di sistema.

La produzione additiva propone un nuovo paradigma per la progettazione ingegneristica e per la produzione, che ha profonde implicazioni economiche, ambientali e di sicurezza; in quanto, la libertà di progettazione offerta da questa categoria di processi produttivi e la sua capacità di stampare localmente quasi ogni oggetto di design avrà ripercussioni importanti in tutta la società.

Mentre le applicazioni additive stanno procedendo dalla prototipazione rapida alla produzione di prodotti per uso finale, le dimensioni ambientali e il relativo impatto di questi processi di produzione in evoluzione devono ancora essere esaminati in modo approfondito.

Inoltre, sono state testate diverse configurazioni di filiere verdi per valutare la fattibilità della produzione additiva combinata con diverse strutture di filiera.

Negli ultimi anni, il concetto di sostenibilità sta emergendo come una delle principali preoccupazioni della società moderna.

In questo contesto, i processi produttivi industriali stanno cambiando grazie allo sviluppo di strategie green.

La scelta di una nuova soluzione di produzione è una decisione strategica cruciale e l'introduzione di nuove tecnologie potrebbe causare profondi cambiamenti all'intera configurazione della filiera.

Sia la tecnologia additiva che quella tradizionale sono state modellate per confrontare la loro efficienza.

Nonostante l'uso delle tecnologie di produzione additiva in molte applicazioni, inclusa la produzione di alcuni prodotti di alto valore per l'uso finale, è ancora un potenziale non sfruttato.

Negli ultimi anni si è verificato un aumento dell'utilizzo della tecnologia additiva per la fabbricazione di prodotti per uso finale, ma un uso massiccio della tecnologia in termini di velocità, costi e qualità, che è accettabile dal consumatore generale, non è ancora ampiamente esistente oggi.

Il concetto di Manufacturing come processo di produzione praticabile non è ancora compreso da molte aziende e consumatori, con il pensiero ancora dominato dalle tecnologie additive per le applicazioni di prototipazione rapida (RP).

Negli ultimi anni sono state sviluppate macchine ibride che combinano la produzione additiva con le tecnologie convenzionali.

I metodi ibridi dei processi di produzione additiva e sottrattiva utilizzano un processo additivo per costruire una forma quasi netta che verrà quindi lavorata alla sua forma finale ottenendo la precisione desiderata.

In questo modo, per determinate tipologie di prodotti, si attenua lo scetticismo sull'adozione della produzione additiva sulla finitura superficiale e sulla precisione, in modo tale che il potenziale della produzione sottrattiva venga esteso a parti di geometria più complessa.

Spesso, per la maggior parte dei produttori tradizionali, implementare la produzione additiva rappresenta una sfida e un investimento importante; infatti, la sfida è studiare un sistema di centri di produzione additiva strategicamente posizionati in grado di integrare la produzione additiva in più impianti di produzione tradizionali.

Quindi mi sono concentrato sull'implementazione della produzione additiva lungo le supply chain cercando di trovare una mia soluzione da proporre per una catena di approvvigionamento ibrida in cui produzione tradizionale e produzione additiva riescano a lavorare in condizioni favorevoli in termini di sostenibilità, economicità e di produzione.

## 2. SOSTENIBILITÀ DELLA PRODUZIONE ADDITIVA

In questo capitolo verranno evidenziati vantaggi e sfide, e si discuteranno le implicazioni della sostenibilità della produzione additiva in termini di configurazione delle catene del valore, di innovazione e di modelli di business. Verrà affrontata, inoltre, la capacità della produzione additiva di produrre oggetti molto complessi.

Infatti, la produzione additiva ha un grande potenziale nel consentire funzionalità ingegneristiche superiori, razionalizzare le catene di approvvigionamento e ridurre l'impatto del ciclo di vita rispetto alla produzione convenzionale.

In particolare, si valuterà se le opportunità offerte dalla produzione additiva per la progettazione sostenibile sono utili anche quando si progetta per un'economia circolare e in che misura la produzione additiva può sopportare la progettazione per un'economia circolare.

Sono disponibili, al momento, solo dati quantitativi limitati su come i prodotti fabbricati dalla produzione additiva si confrontano con quelli fabbricati in modo convenzionale in termini di consumo di energia e materiali, di trasporto, di inquinamento, di rifiuti e di problemi di salute e sicurezza.

L'adozione della produzione additiva sembra preannunciare un futuro in cui le supply chain sono più brevi, più piccole, più localizzate, più collaborative e offrono vantaggi significativi in termini di sostenibilità.

Infatti, la produzione additiva è stata identificata come potenzialmente in grado di fornire una serie di vantaggi in termini di sostenibilità [2].

Tra i numerosi potenziali vantaggi in termini di sostenibilità che questa tecnologia può regalare, ne spiccano alcuni:

- Miglioramenti dell'efficienza delle risorse che possono essere realizzati sia in fase di produzione sia in fase di utilizzo, poiché i processi di produzione e i prodotti possono essere riprogettati per AM;
- Vita estesa del prodotto ottenuta attraverso approcci tecnici come riparazione, rigenerazione e ricondizionamento;
- Catene del valore riconfigurate con filiere più semplici e brevi con la produzione più localizzata e modelli distributivi innovativi;
- Riduzione dei rifiuti durante la produzione, in quanto si tratta di un processo additivo;
- Capacità di ottimizzare geometrie e creare componenti leggeri che riducono il consumo di materiale nella produzione ed il consumo di energia;
- La riduzione dei trasporti nella filiera e la riduzione degli sprechi di inventario a causa della capacità di creare pezzi di ricambio su richiesta;
- I progetti sottoforma di file digitali possono essere facilmente condivisi, facilitando la modifica e la personalizzazione di componenti e prodotti;
- La natura del processo consente risparmi di materiale, così come la capacità di riutilizzare materiale di scarto (esempio la resina) non utilizzato durante la produzione → per le polveri metalliche si stima una riciclabilità del 95-98%.

## 2.1 IMPLICAZIONI DI SOSTENIBILITÀ

Vi sono tre fasi della vita del prodotto che hanno delle implicazioni a livello di sostenibilità:

### 1. Progettazione del prodotto e del processo;

La produzione additiva consente la progettazione di componenti più complessi e ottimizzati grazie a maggiori libertà di forma e geometria, con assiemi più semplici composti da meno parti e meno materiali diversi.

Esempi di miglioramento del prodotto includono una maggiore efficienza operativa, maggiori funzionalità e maggiore facilità di produzione e manutenzione.

Infatti, le libertà di progettazione consentono la creazione di nuove strutture di materiali come reti porose e schiume cellulari aperte.

L'incorporazione di queste nuove strutture nel nucleo dei prodotti può migliorare le caratteristiche dei componenti in fase di design; in questo modo componenti e prodotti possono essere riprogettati per sfruttare le proprietà benefiche della produzione additiva. Incorporando componenti prodotti dalla produzione additiva, come per esempio gli stampi, il processo di produzione può diventare più efficiente dal punto di vista energetico e delle risorse.

L'adozione della produzione additiva può comportare riconfigurazioni della catena del valore e la riprogettazione di prodotti e componenti può portare a prodotti più semplici che richiedono meno componenti, materiali, fasi e attori.

Pertanto, il miglioramento delle prestazioni dei prodotti attraverso la semplificazione può ridurre la scala dei flussi di materiale e portare ad una riduzione dell'impatto ambientale sull'intera catena di approvvigionamento.

Questa caratteristica ha un profondo impatto sulla riduzione dei costi del ciclo di vita del prodotto; infatti, circa un terzo del risparmio energetico si applica alla fase di produzione, il 55-60% durante la fase di utilizzo e l'8% durante la disattivazione [3].

Un esempio importante è nel settore dell'aviazione, dove ogni chilo di materiale risparmiato riduce le spese annuali di carburante di 3000 dollari.

### 2. Elaborazione dell'input materiale;

La produzione additiva richiede generalmente una quantità inferiore di risorse per la produzione e può consentire la conversione di rifiuti e sottoprodotti in prodotti, infatti ci sono esempi, come l'upcycling, che dimostrano che il materiale tradizionalmente considerato come rifiuto può essere riciclato per produrre prodotti di lusso; questo consente di creare valore da ciò che altrimenti sarebbe considerato uno spreco.

La produzione additiva può migliorare le prestazioni ambientali di un'impresa sia attraverso le operazioni eseguite al di fuori del sistema di produzione, come la riduzione dei trasporti attraverso la produzione distribuita, sia quelle operazioni eseguite all'interno del sistema di produzione.

I miglioramenti interni includono un minor utilizzo e spreco di materiale, ottimizzazione del design e selezione ottimale dei parametri di processo.

Pertanto, è chiaro che l'efficienza energetica e gli impatti ambientali della produzione assistita sono altamente specifici in base alle casistiche e dipendono dall'entità



dell'ottimizzazione del progetto, dal volume di produzione, dalla selezione ottimale dei parametri di processo e dalle configurazioni della catena di approvvigionamento.

### 3. Produzione su ordinazione di componenti e prodotti;

L'economia della produzione additiva la rende ideale per la produzione di componenti e prodotti su ordinazione, consentendo la produzione di pezzi di ricambio per la sostituzione e la personalizzazione a costi inferiori.

Possedere un database di progetti digitali consente di fabbricare prodotti su richiesta utilizzando questa tecnologia, e ci può aiutare a eliminare o ridurre al minimo gli sprechi di inventario, ridurre il rischio di inventario senza prodotti finiti invenduti, con il potenziale di migliorare il flusso di entrata poiché le merci vengono pagate prima di essere prodotte.

Inoltre, l'economia della produzione additiva la rende più conveniente per la produzione di pezzi di ricambio, con l'ulteriore vantaggio che i file CAD3D contenenti i progetti dei componenti possono essere facilmente condivisi una volta creati.

Dal punto di vista della sostenibilità, infatti, la natura di questa produzione la rende un processo più efficiente in termini di risorse poiché vengono generati meno rifiuti rispetto alle tecniche sottrattive.

Sebbene si possa sostenere che la produzione additiva sia più energivora per unità prodotta, si può dire che questo tipo di produzione consente di produrre unità per soddisfare esattamente la domanda e quindi va ad offrire il potenziale per migliori prestazioni assolute.

Oltre a ridurre il consumo di risorse, questo modello make-to-order consente l'integrazione diretta tra consumatori/clienti e locali/produttori, con i vantaggi di apprendimento collaborativo di questo approccio.

Lo sviluppo di queste competenze organizzative nella progettazione per la produzione additiva consente di produrre e conservare progetti digitali in modo che i pezzi di ricambio possano essere prodotti su richiesta quando sono necessarie riparazione.

Quindi, insieme agli approcci di progettazione modulare, riparazione, rigenerazione e ricondizionamento, la produzione additiva consentirà l'estensione ed il miglioramento della vita del prodotto.

La relativa facilità e convenienza della produzione di tali pezzi di ricambio e l'integrazione di componenti modulari aggiornati possono indurre aziende affermate a ripensare al proprio modello di business oltre che agli impatti sulla sostenibilità delle loro pratiche.

La semplificazione di prodotti multicomponente complessi in prodotti a componente singolo semplificherà a sua volta le complesse catene del valore ad essi associate, con catene del valore che diventeranno meno gerarchiche e avranno meno fasi di produzione. Quindi indagando sull'adozione della produzione additiva attraverso una prospettiva del ciclo di vita, sono state identificate tre categorie principali in cui questo tipo di produzione consente di ottenere vantaggi in termini di sostenibilità.

Dati questi vantaggi, è chiaro che la produzione additiva svolgerà un ruolo importante nella transizione verso un sistema industriale più sostenibile poiché l'applicazione di queste tecnologie crea opportunità per una produzione ed un consumo più sostenibili.

La produzione additiva offre inoltre alle organizzazioni l'opportunità di sperimentare i propri modelli di business di prodotto-servizio e lo sfruttamento di queste opportunità porterà a cambiamenti nella distribuzione della produzione e alla riconfigurazione delle catene del valore.

## 2.2 PRODUZIONE ADDITIVA IN UN'ECONOMIA CIRCOLARE

La produzione additiva supporta strategie di progettazione circolare creando opportunità per estendere la durata di vita di un prodotto, ad esempio consentendo la riparazione o l'aggiornamento dei prodotti [4].

Tuttavia, l'uso di parti monolitiche strutturalmente complesse che supportano la progettazione per la riciclabilità può ostacolare il recupero di prodotto di alto valore, come la riparazione.

Inoltre, l'attuale offerta di materiali stampabili in 3D dovrebbe essere ampliata con materiali sviluppati per un uso durevole, nonché un riutilizzo di alto valore.

Gli aspetti sopracitati della produzione additiva possono anche offrire nuove opportunità nella progettazione di prodotti per l'economia circolare.

Il design per un'economia circolare è stato recentemente messo a fuoco come una nuova area di ricerca nel più ampio campo del design sostenibile.

In questo paragrafo si analizzerà se le opportunità che la produzione additiva offre per la progettazione sostenibile sono utili anche quando si progetta per un'economia circolare e in che misura questo metodo di produzione può supportare la progettazione per un'economia circolare.

In un'economia circolare, le strategie che consentono la riparazione, il ricondizionamento e la rigenerazione sono preferite al riciclaggio, poiché aiutano a mantenere il valore economico e ambientale di un prodotto nel tempo.

La capacità di creare forme complesse incoraggia il progettista a creare un prodotto in un unico pezzo che è facile da riciclare e contribuisce quindi agli obiettivi di sostenibilità, ma non necessariamente agli obiettivi di economia circolare, per questo ciò dimostra che la progettazione per la sostenibilità nella produzione additiva non porta automaticamente a prodotti che funzionano bene in un'economia circolare.

Durabilità e riciclabilità dipendono estremamente dal materiale e la disponibilità dei materiali riciclati è limitata.

Quindi possiamo dire che la produzione additiva crea opportunità per abilitare strategie di progettazione circolare come aggiornamenti e riparazione che prolungano la durata di un prodotto, anche se queste non sono state considerate nella progettazione del prodotto originale; ciò è attribuito a caratteristiche della produzione additiva come la produzione digitale e l'adattabilità.

Tuttavia, per supportare pienamente la progettazione per un'economia circolare con la produzione additiva è necessario sviluppare materiale che consentano un uso durevole, nonché un riutilizzo di alto valore.

Quindi è essenziale che le opportunità sostenibili offerte da questa tipologia di produzione supportino più cicli di vita del prodotto durante la progettazione per un'economia circolare; infatti, la contabilizzazione della produzione additiva nel processo di progettazione può portare a una nuova generazione di prodotti che operano con successo in un'economia circolare.

## 2.3 STATO DELL'ARTE

I ricercatori sostengono che la produzione additiva offre numerosi vantaggi dal punto di vista della sostenibilità e sarebbe una tecnologia di produzione chiave nella società sostenibile del futuro.

Per quanto riguarda la sostenibilità ambientale, la produzione assistita tutela energia, risorse ed emissioni.

Allo stato attuale, le parti prodotte da produzione additiva possono essere utili per lotti molto piccoli o nei casi in cui le riprogettazioni basate su questo tipo di produzione offrono vantaggi funzionali sostanziali durante la fase di utilizzo del prodotto come, ad esempio, la progettazione di parti leggere.

Nel complesso, la produzione additiva dovrebbe diventare una chiave tecnologica manifatturiera nella società sostenibile del futuro.

Inoltre, si prevede che la produzione additiva diventerà più conveniente in quanto volumi di produzione maggiori diventeranno più economicamente fattibili rispetto ad oggi.

I vantaggi economici dovuti all'efficienza e ai miglioramenti dei processi nella progettazione, test e produzione sono maggiori dei vantaggi derivanti dall'evitare investimenti in attrezzature.

Quindi, visto che una volta rilasciato il progetto della parte, la produzione inizia immediatamente, la riduzione del ritardo tra la progettazione e la produzione si traduce in un risparmio sui costi.

I dati qualitativi e le analisi della letteratura mostrano che i motivi economici sono i motivi principali per l'adozione della produzione additiva, mentre i benefici di sostenibilità sociale e ambientale sono i driver meno importanti per la sua adozione.

La maggior parte delle aziende ha adottato la produzione additiva per risparmiare tempo e denaro, in particolare nei processi di sviluppo di nuovi prodotti, nella personalizzazione e nella produzione di piccoli volumi.

Una piccola percentuale di aziende ha adottato la produzione additiva a causa dei benefici ambientali; quindi, la motivazione dell'azienda ad adottare questo metodo di produzione non sono in linea con i benefici di sostenibilità dichiarati in letteratura.

Inoltre, le motivazioni per l'uso della produzione additiva sono per lo più innescate dalle sue caratteristiche uniche, tra cui la natura senza strumenti e la complessità senza costi.

In generale, dalla letteratura emerge che le priorità del settore nell'utilizzo della produzione additiva non sono coerenti.

La portata della loro attenzione a criteri come creatività, parte complessa, personalizzazione, risparmio costi e tempo costituisce la base di queste differenze.

Viene inoltre chiarito che la maggior parte degli adottatori utilizza la produzione additiva per prodotti innovativi, complessi e personalizzati che possono creare valore aggiunto.

Queste circostanze sono altamente coerenti con gli approcci delle economie sviluppate e creano pool di opportunità per scopi di reshoring.

## 2.4 CONSUMO ENERGETICO

In questo paragrafo si tratterà l'identificazione del consumo energetico e dei parametri operativi relativi alla progettazione dello stampo, ai processi di produzione e allo stampaggio ad iniezione

Si tratteranno i cambiamenti netti nel lead time della catena di approvvigionamento, il consumo di energia primaria del ciclo di vita e le emissioni di gas serra (GHG) associati alle tecnologie della produzione additiva per il caso dello stampaggio ad iniezione, per fare luce sui vantaggi del passaggio da produzione convenzionale onshore alla produzione additiva negli stati uniti per quanto riguarda l'ambiente e l'economia.

La produzione additiva produce un potenziale di riduzione dal 3% al 5% di energia primaria, dal 4% al 7% di emissioni di gas serra, dal 12% al 60% di lead time e dal 15% al 35% di costi su 1 milioni di cicli di produzione dello stampaggio ad iniezione a secondo del progresso tecnologico della produzione additiva nel futuro [5].

I vantaggi economici indicano il ruolo significativo della produzione additiva nell'aumentare la competitività manifatturiera globale dei produttori locali, mentre i vantaggi ambientali evidenziano la necessità di considerare compromessi e le tecniche di equilibrio tra prestazioni ambientali ed economiche quando la produzione additiva viene adottata nell'industria degli utensili.

La produzione additiva, quindi, può aiutare a risolvere le difficoltà di produzione e consentire nuovi progetti a vantaggio sia delle prestazioni che dell'ambiente.

Alcune delle innovazioni più importanti sono i canali di raffreddamento conformi nello stampo a iniezione; infatti, la produzione additiva può ridurre notevolmente gli sforzi di gestione nella complessa catena di approvvigionamento globale dell'industria dello stampaggio ad iniezione.

Con la tecnologia della produzione additiva, gli stampi possono essere prodotti internamente, il che snellisce notevolmente la catena di approvvigionamento; inoltre, l'intensificazione dei processi e l'elevata automazione apportata dalla produzione additiva mantengono la promessa di preservare contemporaneamente il costo dell'outsourcing, il che migliora la competitività dei produttori locali.

L'analisi considera l'incertezza delle prestazioni nelle attuali e future tecnologie della produzione additiva avanzate per la produzione diretta e la rigenerazione di uno stampo ad iniezione e confronto i tempi di consegna, l'energia del ciclo di vita e le emissioni di gas a effetto serra rispetto alla produzione convenzionale e offshore in un modo analiticamente coerente.

Vengono considerate anche le variabili relative a località, politiche, tecnologiche, produzioni e catene di approvvigionamento.

Tale analisi è importante per comprendere l'intero quadro del ruolo della produzione additiva nella riduzione del consumo di energia industriale e delle emissioni di gas a effetto serra, aumentando allo stesso tempo la competitività a livello globale.

È stato considerato uno stampo a una cavità e un design di prodotto in plastica, che ha identificato il consumo energetico e i parametri operativi relativi alla progettazione dello stampo e ai processi di produzione.

Lo stampo in questione è costituito principalmente da due categorie di componenti: il primo gruppo comprende la cavità dello stampo e le sue anime che determinano direttamente la geometria delle parti stampate, il resto invece sono basi per stampi, dove le anime e le cavità dello stampo sono montate su piastre fisse e piastre mobili.

Per analizzare le diverse caratteristiche e l'impatto associato della produzione additiva distribuita sulla produzione convenzionale sono stati generati quattro scenari combinando i casi di progettazione, i percorsi di produzione e le catene di approvvigionamento:

1. Produzione convenzionale offshore;
2. Produzione convenzionale a terra;
3. Produzione additiva interna assumendo le performance attuali;
4. Produzione additiva interna presupponendo una performance futura.

Questi quattro scenari includevano tutte le principali opzioni potenziali nella produzione di stampi per il confronto della produzione additiva e la produzione tradizionale, comprese le catene di approvvigionamento rappresentative internazionali, percorsi convenzionali ed additivi, tecnologie della produzione additiva e potenziali miglioramenti considerando le differenze associate.

La figura 2 [5] riassume i compromessi economici e ambientali delle possibili opzioni di produzione e gli sviluppi della produzione additiva durante la transazione dalla produzione convenzionale a quella distribuita con tecnologie mature come per il caso dello stampaggio ad iniezioni.

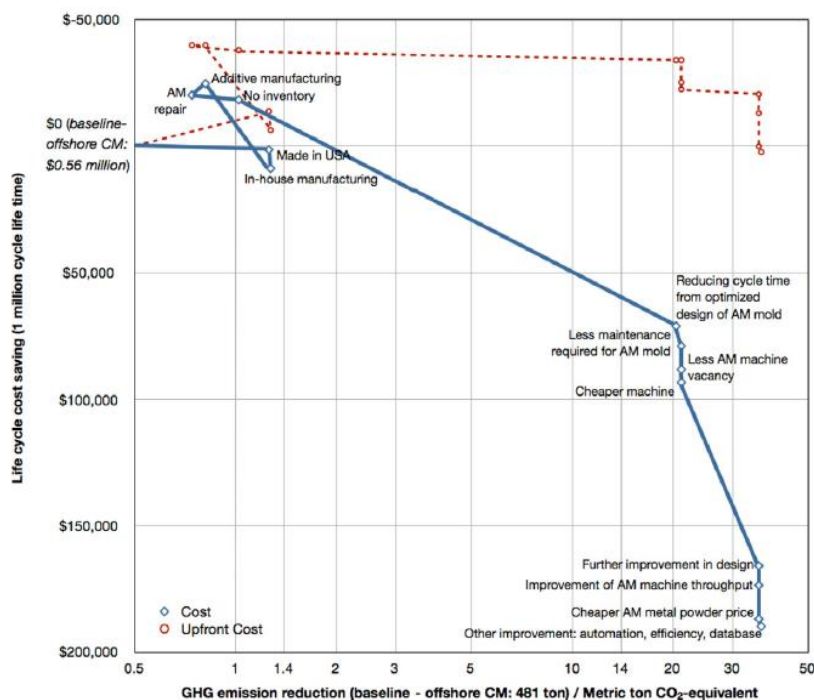


Figura 2 - Tabella di marcia che mostra il potenziale impatto sulle emissioni di gas a effetto serra e sui costi per l'implementazione della produzione additiva distribuita (AM) con lo sviluppo tecnologico.

Gli sviluppi sono stati allineati in ordine di facilità di adozione o di sviluppo; ad esempio, la prima opzione è il reshoring degli ordini negli Stati Uniti e la seconda opzione prende l'ordine internamente, che richiede capacità di produzione ed esperienza di manodopera per la produzione convenzionale rispetto alla prima opzione.

La tabella di marcia per l'impatto evidenzia che in questo momento il potenziale di miglioramento della progettazione da solo, con un vantaggio importante nella fase di utilizzo, potrebbe portare competitività alla produzione additiva rispetto a quella tradizionale.

Infatti, senza i vantaggi della fase di utilizzo, costruire direttamente lo stampo con la produzione additiva applicando il design originale, può aumentare, anziché diminuire, gli impatti.

Nel paradigma della produzione distribuita, dovrebbe essere evitata una capacità sovradimensionata della macchina della produzione additiva per l'assistenza e la condivisione delle capacità della tecnologia tra i produttori locali e le linee di produzione potrebbe essere un modo in futuro per migliorare il tasso di utilizzo.

La figura 3 evidenzia l'impatto dello stampo sul lead time e dalla culla al gate, mentre la figura 4 mostra il confronto tra il tempo di ammortamento e l'impatto del ciclo di vita assegnato al prodotto iniettato in unità tra tutti e quattro gli scenari [5].

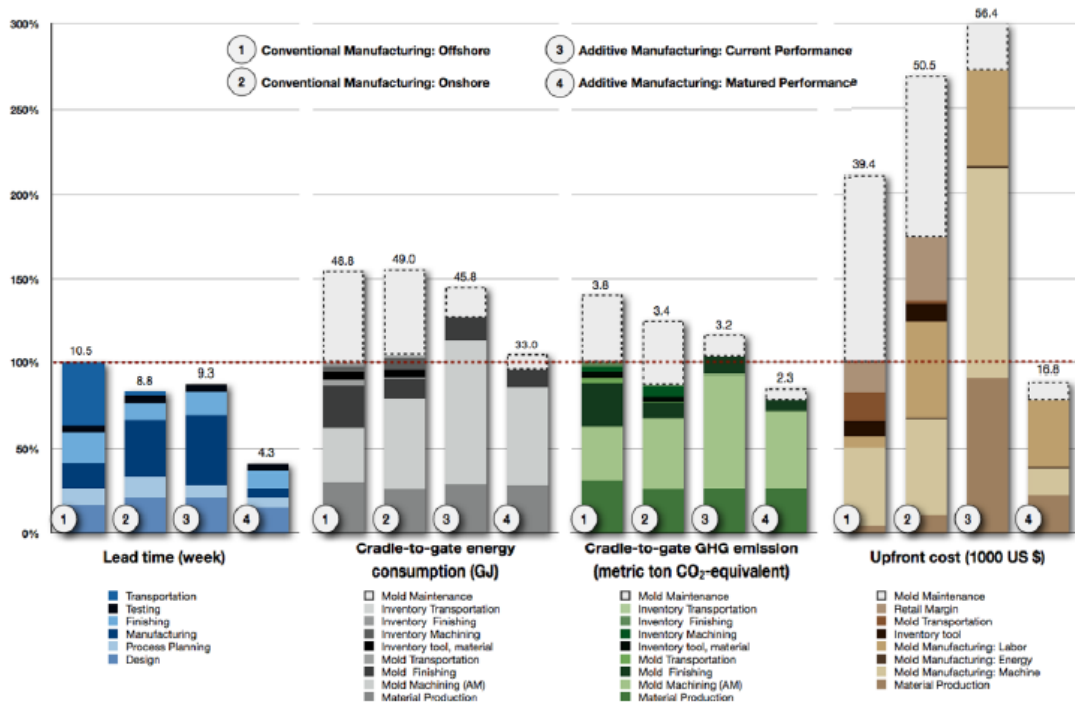


Figura 3 – Impatti del lead-time e dalla culla alla tomba in diversi scenari rispetto allo scenario di produzione convenzionale offshore come scenario di base. AM = produzione additiva; CO<sub>2</sub> = anidride carbonica; GHG = gas serra; GJ = GIGAJoule.

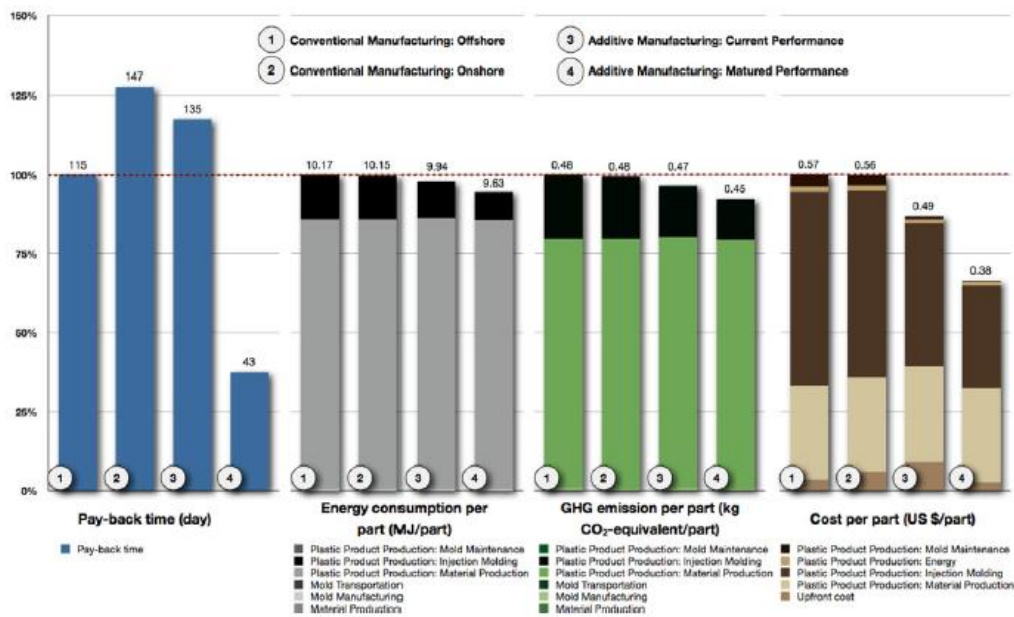


Figura 4 - Il tempo di ritorno dell'investimento e gli impatti del ciclo di vita assegnati alla parte in plastica stampata ad iniezione di unità in scenari diversi rispetto allo scenario di produzione convenzionale offshore come riferimento. CO<sub>2</sub> = anidride carbon; GHG = gas serra; MJ = MEGAJOULE.

In questo caso, è stato presentato un modello tecnico-economico integrato per stimare il lead time, il consumo di energia primaria nel ciclo di vita e le emissioni di gas serra.

I risultati delle analisi in questo studio hanno prodotto risparmi potenziali dal 12% al 60% di lead time, dal 70% all'80% di downtime, dal 3% al 5% di energia primaria e dal 4% al 7% di emissioni di gas serra attraverso i 1 milione di cicli di stampaggio a iniezione.

La realizzazione di progetti ottimizzati, il miglioramento della produttività delle macchine, la riduzione degli spazi vuoti delle macchine e la riduzione dei costi dei materiali sono identificati come gli sviluppi tecnologici della produzione additiva che porteranno alla maggior parte dei potenziali vantaggi in futuro.

Il vantaggio ambientale di questa tecnologia in questo caso di utensili è relativamente marginale rispetto ai vantaggi economici, il che indica l'importanza di bilanciare i compromessi economici ambientali con le misure necessarie come lo sviluppo di progetti di utensili con un tasso di scarto ottimale.

La percentuale di beneficio ambientale può essere ulteriormente ridotta per altri casi di utensili con parametri diversi, come gli strumenti a cavità multiple.

Lo scopo di questo studio non considera le possibili ulteriori implicazioni in termini di energia, emissioni e costi derivanti dall'immagazzinamento di materiali, strumenti di inventario e lotti di prodotti prima che fossero distribuiti ai clienti.

Inoltre, poiché il tasso di scarto della produzione dello stampo con la produzione convenzionale e l'importanza dei materiali leggeri potrebbero non essere così elevati come altri componenti come quelli dell'industria aeronautica, i vantaggi dell'efficienza dei materiali della produzione additiva non sono stati ben illustrati e discussi in questo studio.



I potenziali di risparmio, in particolare i benefici ambientali, per la produzione additiva distribuita potrebbero essere molto maggiori se fossero coinvolte industrie con priorità elevate nella riduzione della massa e del tasso di scarto.

I risultati aiutano anche a individuare le innovazioni tecnologiche nella produzione additiva che potrebbero portare a vantaggi più ampi in futuro.

### 3. ECONOMICITÀ DELLA PRODUZIONE ADDITIVA

Uno dei temi con cui più si scontra l'adozione della produzione additiva nelle supply chain è quello economico.

Molte aziende si stanno concentrando sulla produzione additiva e sul suo potenziale per cambiare il paradigma industriale in termini di sostenibilità economica.

I noti vantaggi della tecnologia additiva includono la flessibilità di lanciare prodotti rapidamente senza requisiti di attrezzature personalizzate e costi di produzione economicamente vantaggiosi per volumi di produzione inferiori.

Con l'introduzione della nuova tecnologia si presentano le sfide dell'utilizzo di apparecchiature nuove ed esistenti in modo sincronizzato che in definitiva supporta gli obiettivi aziendali.

A supporto del responsabile della produzione vengono proposti diversi strumenti di supporto alle decisioni.

Considerando che le tradizionali economie di scala si applicano solo in parte ai processi di produzione additiva, in questo capitolo si identificheranno modalità di progettazione del prodotto ed il loro relativo effetto sul costo unitario dello stesso, esponendo una proprietà insolita per cui il punto operativo ottimale in termini di costi si verifica intorno ad un numero ben preciso di unità prodotte in base alla capacità della macchina, infatti si analizzeranno gli effetti della curva di apprendimento relativi alla ripetizione del processo e all'esperienza dell'operatore.

Si identifica un quadro per i leader e i manager di produzione, per l'implementazione di misure di efficienza, che aiuterà ad adottare la produzione additiva in un ambiente di produzione.

Alcuni settori, come gli apparecchi acustici, hanno cambiato l'intero processo di produzione dalla produzione tradizionale alla produzione additiva in breve tempo, facendo presupporre che la seconda sostituirà la prima.

In questo capitolo si analizzerà anche in che misura la produzione additiva sia in grado di sostituire la produzione tradizionale basata su strumenti in contesti in cui deve competere solo sulla base del costo unitario.

Questo ha implicazioni sostanziali per la disponibilità di economie di scala che determinano il costo delle operazioni di produzione su larga scala.

Se la produzione additiva deve soddisfare le previsioni di adozione su larga scala anch'essa dovrà mostrare una relazione volume-costi conveniente.

Una delle aree più promettenti per l'adozione della produzione additiva è la manutenzione, in particolare la produzione di pezzi di ricambio.

Il potenziale di personalizzazione e le eccellenti capacità di piccole serie della produzione additiva possono portare alla riduzione della dimensione dei magazzini, accorciare le catene di approvvigionamento e soprattutto alla riduzione dei costi di logistica.

### 3.1 MODELLI ECONOMICI DELLE OPERAZIONI DI PRODUZIONE ADDITIVA

Prenderemo in considerazione i modelli di costo proposti sull'economia della produzione additiva, in cui i costi si basano sia su volumi che su stime di tempo per le varie fasi del processo.

Modelli di costo sulla produzione additiva, a prima vista, indicano una somiglianza nel comportamento in termini di costi tra esse e i processi di produzione convenzionale come lo stampaggio ad iniezione, in cui i costi fissi degli utensili sono distribuiti sulla quantità di produzione; tuttavia, poiché la produzione additiva non si basa su strumenti fisici di alcun tipo le unità di spazio in costruzione sono quasi perfettamente sostituibili o fungibili e quindi è possibile per gli utenti ridurre i costi riempiendo aree vuote dello spazio di costruzione con altre parti.

Quindi, le economie di scala statistiche derivanti dall'aumento della produttività e dall'utilizzo della capacità hanno effetto più o meno allo stesso modo della produzione tradizionale, nonostante l'assenza di attrezzature fisiche dedicate, ma nella produzione additiva c'è una duplice relazione tra volume e costo:

- Per l'utilizzo delle capacità il costo unitario si riduce man mano che lo spazio di costruzione prestabilito viene riempito, mentre l'astensione dal farlo comporta una severa penalizzazione dei costi;
- Per la velocità di produzione, il costo unitario diminuisce man mano che lo spazio di costruzione aggiuntivo viene impegnato nell'operazione di costruzione, mentre l'astenersi dall'allocare questa capacità aggiuntiva comporta una penalità di costo.

Nella figura 5 [6] si illustra la differenza fondamentale tra i processi additivi e convenzionali basati su strumenti come lo stampaggio ad iniezione.

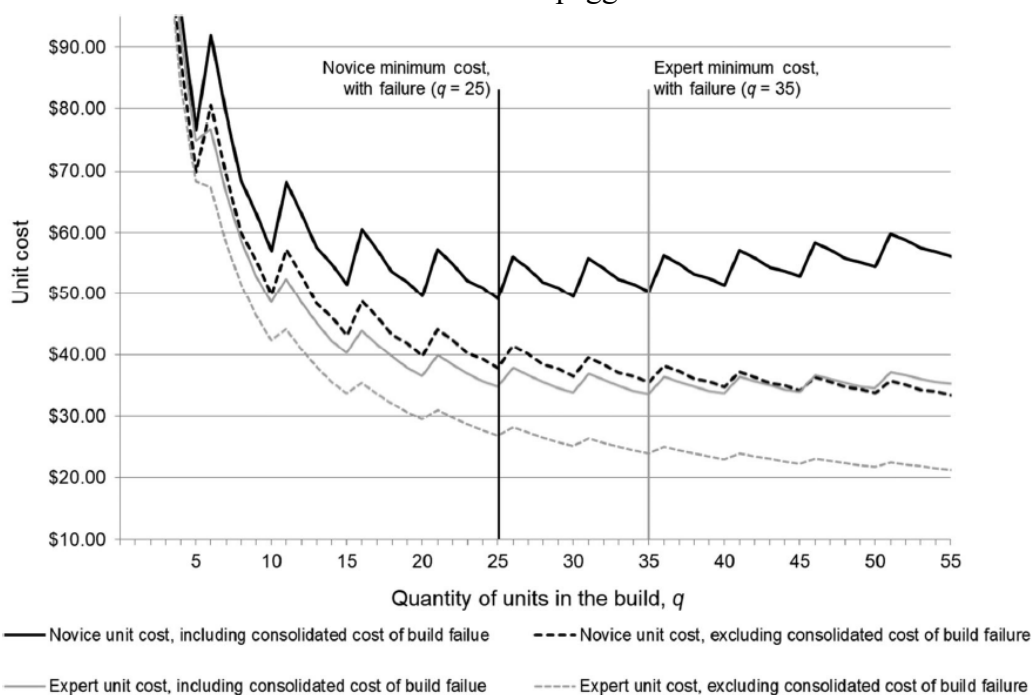


Figura 5 – Relazione tra costo e quantità nel processo di produzione additiva.

Poiché il volume di costruzione è completamente utilizzato con  $q=55$  parti, non vi è alcun vantaggio in termini di costi per la produzione in più.

Infatti, è vero il contrario in quanto la produzione di  $q=56$  parti richiederebbe un nuovo ciclo di produzione, sostenendo così nuovamente l'intero costo dell'installazione.

Mentre la curva dei costi nella produzione convenzionale basata su strumenti diminuisce in modo asintotico all'aumentare del volume, si vede che il costo unitario continua a ridursi all'aumentare del volume, questo non è il caso della produzione additiva.

Il punto ottimale in termini di costi nella produzione additiva è il punto in cui si opera con il costo più basso per una fase di costruzione.

Da questa analisi si può affermare che l'economia della produzione additiva sia effettivamente diversa dalla produzione basata su strumenti, ma allo stesso tempo le economie di scala statiche si applicano alla produzione additiva più o meno allo stesso modo della produzione tradizionale, sia attraverso l'utilizzo delle capacità sia attraverso gli effetti di throughput.

Ogni fase di processo, nella produzione additiva, è concettualizzata al meglio come un singolo lotto con un limite di capacità superiore che è determinato dalle caratteristiche della macchina, come per esempio l'altezza massima di costruzione: volumi di produzione oltre la dimensione massima della macchina richiedono un processo di compilazione aggiuntivo, che quindi costituisce una nuova fase di produzione.

Pertanto, contrariamente alla produzione tradizionale, l'economia della produzione additiva è modellata dall'assenza di attrezzature fisiche, che comporta il non impegno per qualsiasi forma o design specifico, data la caratteristica più saliente della produzione additiva che è la sua capacità di produrre economicamente alti livelli di varietà di prodotti.

Possiamo combinare la discussione fatta in questo paragrafo in un insieme di caratteristiche chiave del processo di produzione additiva:

- La varietà dei prodotti può essere prodotta ad un costo marginale prossimo allo zero;
- Ogni fase di costruzione del prodotto è un processo verticale con una dimensione batch massima determinata dalla capacità del volume della fase;
- Le economie di scala statiche basate sul volume si applicano fino all'utilizzo completo del volume di costruzione, ma non oltre;
- Gli effetti della curva di apprendimento si applicano sia alle fasi di preelaborazione che di post-elaborazione.

Nel più ampio contesto della digitalizzazione della produzione, la produzione additiva rappresenta chiaramente uno dei nuovi sviluppi più interessanti nella gestione delle operazioni e fornisce un ricco contesto di approfondimenti ed analisi future.

### 3.2 SOSTENIBILITÀ ECONOMICA NELLE INDUSTRIE DI PROCESSO PER LE ATTIVITÀ DI MANUTENZIONE NELLA CATENA DI APPROVVIGIONAMENTO

L'industria a processo continuo è caratterizzata da volumi di produzione estremamente elevati con macchine costose e tempi di fermo; la combinazione di queste caratteristiche con modelli intermittenti di domanda di pezzi di ricambio e la predominanza della manutenzione reattiva, spinge le aziende a mantenere grandi scorte di pezzi di ricambio, il che rende molto interessante l'introduzione della produzione additiva nella manutenzione dell'industria di processo.

In questo paragrafo l'oggetto di analisi sarà su come la produzione additiva potrebbe modificare le attività di manutenzione e della catena di approvvigionamento nelle industrie di processo ed il suo impatto economico valutato utilizzando modelli di costo basati sul processo.

Lo scopo dell'analisi è supportare il processo decisionale e contribuire alla definizione di strategie e modelli di business.

L'opportunità di accorciare le catene di approvvigionamento combinata con i limiti del volume di produzione rendono la manutenzione industriale un caso molto convincente per l'adozione della produzione additiva.

Anche se l'industria di processo potrebbe non essere interessata a ridurre il peso, l'eliminazione delle scorte non necessarie rende questa tecnologia interessante per la produzione decentralizzata di pezzi di ricambio.

Le tradizionali catene del valore di pezzi di ricambio sono spesso lunghe e complesse e i metodi di produzione convenzionali, come lo stampaggio, richiedono attrezzature costose e dedicate, come gli stampi e ciò rende impraticabile la produzione di piccoli lotti, per cui per ridurre i costi e far fronte alla variabilità dei tempi di consegna, le aziende spesso ordinano più di un pezzo, mantenendo così uno stock minimo di sicurezza.

Comprendere l'impatto economico dei pezzi di ricambio prodotti in modo additivo è particolarmente importante per lo sviluppo di nuove strategie di manutenzione e gestione del magazzino dei pezzi di ricambio; infatti, decidere quando investire nella produzione additiva e definire le strategie ideali per farlo, ad esempio la valutazione delle scorte minime da tenere in magazzino, pone una serie di nuove sfide per la gestione dell'inventario.

Capire quali pezzi di ricambio acquistare e quali produrre dipende fortemente dal costo di ciascuna opzione.

L'analisi di costo proposta [7] comprende le tre fasi del tradizionale modello di costo della catena del valore dei pezzi di ricambio per quanto riguarda il manufacturing, integrando l'ottimizzazione delle parti tramite il design come fase aggiuntiva della catena del valore.

Sono state individuate le principali attività della filiera del processo produttivo in tre fasi:

- Pre-processing;
- Processing;
- Post-processing.

Il costo totale della produzione è la combinazione dei costi di queste tre fasi.

Il costo di pre-processing include il costo dell'operatore, il costo della macchina e i materiali di consumo necessari per impostare la macchina.

Il costo di processing risulta dal costo orario della macchina moltiplicato per la durata del processo, combinato con i materiali di consumo ed il costo e consumo di energia (E).

I costi di post-processing risultano dal costo dell'operatore della macchina, moltiplicato per il tempo necessario per completare le attività descritte di cui sopra.

Le equazioni dei costi sono di seguito elencate [7].

Equazione 1 – Pre-processing Cost

$$(1) C_{pre} = (C_{op} + C_{machine}) * (t_{warmup} + t_{setup} + t_{inert}) + C_{cons}$$

Equazione 2 – Processing cost

$$(2) C_{process} = C_{machine} * (t_{scan} + t_{pd}) + C_{cons} + C_{energy} * E$$

Equazione 3 - Post-processing cost

$$(3) C_{post} = C_{op} * (t_{clean} + t_{removal} + t_{inspection}) + C_{machine} * (t_{clean} + t_{removal} + t_{cd})$$

Per passare dai metodi di produzione convenzionali alla produzione additiva, però, l'azienda deve prima passare dal design.

Infatti, l'azienda deve prima acquisire un modello 3D del pezzo di ricambio e questo può essere fatto o acquistandolo dal produttore o effettuando il reverse engineering, utilizzando uno scanner o affidandosi solo all'esperienza dell'ingegnere.

Dopo aver acquisito il modello 3D, viene sottoposto ad un processo di analisi strumentale e, se possibile, ad un processo di ottimizzazione del design per ridurre l'utilizzo di materiale non necessario a sfruttare appieno il processo.

In ogni caso, il costo di ingegneria è principalmente determinato dal costo orario dell'ingegnere e dal tempo necessario per completare tutte le procedure di reverse engineering e ottimizzazione.

Inoltre, si deve considerare il costo dello scanner ed il costo del software utilizzato.

Equazione 4 -Engineering cost

$$C_{eng} = (C_{op} + C_{sw} + C_{scanner}) * t_{eng}$$

I costi e gli input degli utenti necessari per il modello sono riepilogati nella Tabella 1 [7].

Tabella 1 - Attività e input di costi e dell'utente

Attività	Input di costo	Input dell'utente
Ingegneria	Costo del lavoro Costo del software Costo dello scanner 3D	Lavoro necessario

Quindi, eliminando la necessità di strumenti specifici, la produzione additiva consente alle aziende di ampliare la propria gamma di fornitori, migliorando così i tempi di consegna, la resilienza e riducendo la dipendenza dai fornitori.

Andremo ora a commentare tramite dei grafici un confronto dei costi tra la produzione additiva e la forgiatura per uno stock di sicurezza di 21 pezzi (linee blu e arancioni) e 0 pezzi (linea grigia).

La figura 6 [7] mostra la variazione dei costi di produzione in funzione del volume di produzione.

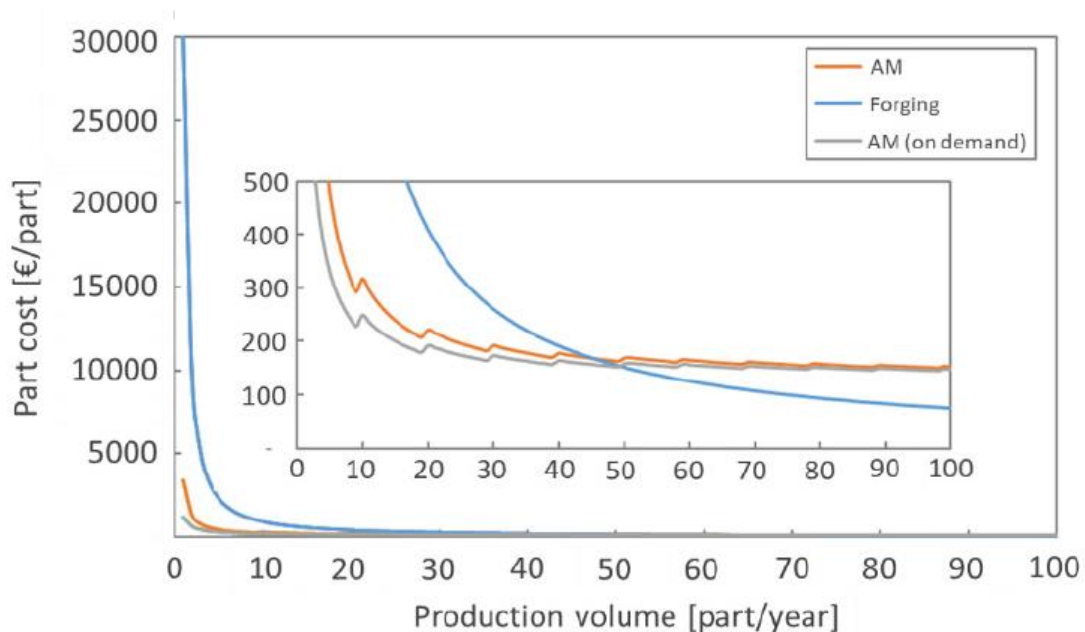


Figura 6 - Confronto dei costi tra AM e forgiatura, per uno stock di sicurezza di 21 pezzi (linee blu e arancioni) e 0 pezzi (linea grigia).

Come si vede, la produzione additiva è competitiva solo per bassi volumi di produzione (<46 parti all'anno).

Il fattore principale che determina gli elevati costi di produzione in bassi volumi con la forgiatura è la necessità di un grande investimento iniziale negli stampi.

Inoltre, l'analisi rivela l'importanza di massimizzare l'utilizzo della macchina, in quanto qualora l'azienda decidesse di acquisire una macchina e di produrre il pezzo in proprio, diventa indispensabile garantire un volume di produzione sufficiente per occupare la macchina.

Poiché la produzione additiva sembra essere competitiva solo per i pezzi di ricambio con bassi volumi di produzione annuo, molto probabilmente la macchina dovrà essere non dedicata.

Viene quindi effettuato un confronto tra la distribuzione dei costi per i processi additivi e la forgiatura.

La tabella 2 [7], infatti, illustra che la maggior parte del costo di produzione additiva è associato alla macchina (75%).

Tabella 2 - Ripartizione dei costi di AM (a sinistra) e forgiatura (a destra) per un volume di produzione di 50 pezzi.

		<b>AM</b>	<b>Forgiatura</b>
Design	Lavoro	4.0%	-
	Software	3.7%	-
Manufacturing	Macchina	75.3%	1.2%
	Materiali	4.7%	0.5%
	Materiali di consumo	4.7%	0.0%
	Lavoro	2.2%	0.4%
	Costruzione	3.3%	0.0%
	Energia	0.1%	0.7%
	Manutenzione	-	0.1%
	Strumenti	0.0%	90.1%
Gestione del magazzino	Lavoro	0.1%	0.1%
	Capitale	6.5%	6.9%
	Warehouse	0.0%	0.0%

L'aumento del volume di produzione non comporta variazioni significative nella ripartizione dei costi ed il valore della manodopera, invece, diventa meno rappresentativo a causa del presupposto che l'operatore impieghi più tempo per preparare i dati per la prima produzione.

Inoltre, diminuisce la preponderanza del costo di costruzione, essendo un costo fisso; quindi, si diluisce sul numero dei pezzi prodotti.

Il costo dell'energia è pressoché irrilevante in quanto rappresenta solo lo 0,7% del costo totale.

Come accennato in precedenza, il costo di forgiatura è principalmente determinato dallo stampo (96%), tuttavia questo costo è fisso e quindi diluito per volumi di produzione più elevati.

Il materiale utilizzato nella forgiatura è notevolmente più economico della polvere utilizzata nella produzione additiva, il che rafforza l'importanza dell'ottimizzazione del design per rendere il primo costo competitivo.



Questa analisi affronta la questione della valutazione della fattibilità economica dell'introduzione di tecnologie di produzione additiva nelle catene di manutenzione, riparazione e fornitura in generale. Come previsto, l'analisi dei costi di produzione ha rivelato che la produzione additiva è competitiva in termini di costi solo nei pezzi di ricambio con modelli di domanda annua bassi.

L'analisi delle scorte di sicurezza rivela che i risparmi annuali ottenuti eliminando le scorte di sicurezza possono costituire un argomento convincente per adottare questa tecnologia nella produzione di pezzi di ricambio con modelli a bassa domanda.

L'alto costo di produzione in volumi elevati deriva dall'alto costo delle macchine e dai lunghi tempi di lavorazione rispetto ad alternative più consolidate, come la forgiatura.

## 4. BARRIERE ALLA DIFFUSIONE DELLA PRODUZIONE ADDITIVA

La produzione additiva sta trasformando la tecnologia e la distribuzione del capitale di produzione.

Per valutare se l'industria sia ben attrezzata per affrontare il potenziale impatto negativo sull'ambiente e sulla salute, sono necessari strumenti di valutazione proattivi in modo che sviluppatori e progettisti di materiali, operatori di stampa e utenti finali possano creare e scegliere i materiali ed i processi additivi più appropriati e sicuri in base ai loro casi d'uso. Le attuali valutazioni del ciclo di vita della produzione additiva non forniscono informazioni sufficienti per supportare le decisioni sui materiali, basate sulle preoccupazioni relative all'esplosione dei rischi.

Pertanto, è stato analizzato un quadro che integra il ciclo di vita additivo con parametri di progettazione ecologica e di rischio derivanti dall'analisi degli impatti sulla salute umana e sull'ambiente nelle fasi successive alla produzione.

Sono state identificate le metodologie esistenti adatte per la valutazione attraverso queste fasi sintetizzando le metriche di livello superiore per l'analisi comparativa dei materiali. Le metodologie di valutazione del ciclo di vita quantificano i potenziali compromessi sulla salute umana e sugli impatti ambientali della produzione additiva, ma sono limitate alla valutazione dei rischi tossicologici e ambientali.

L'accessibilità della tecnologia additiva rende più comune l'esposizione ai rischi di produzione, poiché le stampanti su larga scala per uso domestico o scolastico stanno aumentando la propria diffusione, viene introdotto un nuovo flusso di rifiuti distribuito di materiale, di cui bisogna analizzare la riutilizzabilità, la biodegradabilità e il danno ecologico che non sono ancora ben chiare allo stato attuale dell'arte.

La crescente preoccupazione per i rischi dei materiali, la crescente pressione normativa e un crescente impegno per la sostenibilità da parte delle aziende motivano la ricerca all'uso di materiali additivi migliori e più sicuri.

In generale, gli sviluppatori e i ricercatori stanno cercando di aumentare l'efficienza e l'efficacia della tecnologia per renderla più veloce, più economica e più affidabile. Inoltre, esistono diverse barriere a livello politico, oltre a limitazioni tecniche, che causano la mancanza di standardizzazioni e legislazione, la carenza di manodopera istruita e qualificata, preoccupazioni per la proprietà intellettuale e la mancanza di informazioni sull'idoneità e disponibilità della produzione additiva per la produzione su larga scala.

L'ambito di questo capitolo sarà principalmente limitato alle metodologie di valutazione relativa alla produzione additiva che coprono il rischio materiale, la chimica sostenibile e il fine vita ecologico.

Infatti, al fine di integrare efficacemente la produzione additiva al ciclo di vita del prodotto verranno presi in considerazione valore e carenze.

Il contributo delle scelte dei materiali rispetto alla salute umana e agli impatti ecologici complessivi diventa sempre più significativo, rendendo molto importanti l'analisi e il confronto degli impatti relativi a materiali specifici.

## 4.1 ANALISI E CRITICITÀ DEL CICLO DI VITA DELLA PRODUZIONE ADDITIVA

Il ciclo di vita della produzione additiva verrà scomposto ed analizzato in sei fasi [8]:

1. Ricerca delle materie prime;
2. Approvvigionamento e produzione delle materie prime;
3. Processo di stampa;
4. Smaltimento dei rifiuti del processo di stampa;
5. Uso della stampa;
6. Smaltimento delle stampe.

Le materie prime per la produzione additiva vengono estratte dalla terra, derivanti da fonti biologiche, oppure riutilizzate da materiali esistenti.

L'uso di fonti di materiale biologico e riciclato spesso sembrano essere l'opzione più interessante a causa della loro adesione ai principi di progettazione ecologica, ma analizzando un ciclo di vita dettagliato si rileva che alcuni polimeri a base biologica possono presentare un maggiore impatto ambientale.

I principi della chimica sostenibile forniscono una prospettiva diversa che i produttori di sostanze chimiche e i responsabili della catena di approvvigionamento stanno iniziando ad implementare.

Infatti, la chimica sostenibile è definita dalla US Environmental Protection Agency come "la progettazione di prodotti chimici che riducono o eliminano l'uso di sostanze pericolose".

I principi della chimica sostenibile più rilevanti per la produzione industriale di sostanze chimiche sono la riduzione dei rifiuti, la prevenzione dell'esplosione di sostanze chimiche pericolose, la scelta delle reazioni più efficienti e l'utilizzo di processi a minor consumo energetico.

Anche se l'esposizione al rischio riguardante le sostanze chimiche utilizzate è meno preoccupante durante le fasi di approvvigionamento e produzione, rispetto alle fasi successive del ciclo di vita della produzione additiva, attribuibili ai controlli tecnici e ai dispositivi di protezione individuale utilizzati negli ambienti industriali, la tossicità e le caratteristiche ambientali sono ancora importanti in caso di incidenti o perdite e possono influenzare gli ecosistemi, le comunità e i lavoratori in cui questi materiali vengono prodotti o reperiti.

Per affrontare queste considerazioni, una metodologia appropriata per valutare l'approvvigionamento e la produzione dei materiali dovrebbe includere metriche che partono dai principi di progettazione ecologica e dalle metodologie di valutazione dei rischi per integrare un ciclo di vita globale della produzione additiva da monte a valle.

Le metriche di progettazione ecologica includono quelle che valutano i rifiuti, la resa di reazione, il parametro di recupero del materiale, l'efficienza della massa di reazione, l'efficienza dell'atomo e la stechiometria.

Combinando questi fattori in una valutazione complessiva, infatti, quando si valutano le fasi di approvvigionamento e produzione dei materiali nel ciclo di vita additivo, le metriche ed i principi della chimica sostenibile, insieme ai rischi, dovrebbero essere presi

in considerazione per fornire una visione completa della sostenibilità per la scelta dei materiali.

I rischi più evidenti relativi ai materiali additivi vengono solitamente presentati all'operatore e a coloro che si trovano nell'ambiente produttivo durante il processo di stampa.

Le vie di esposizione ai rischi variano a seconda del tipo di processo; la tecnologia additiva è suddivisa in sette diverse tipologie di processo:

1. Stereolitografia;
2. Material jetting;
3. Fusione a letto di polvere;
4. Binder jetting;
5. Estrusione;
6. Deposizione a fascio di energia;
7. Laminazione.

Tutte queste metodologie presentano una qualche forma di pericolo per l'operatore.

Queste forme di pericolo includono il contatto e i rischi ambientali, i rischi fisici, le emissioni di particolato, comprese le emissioni di particolato ultrafine.

Una valutazione completa affronta ciascun pericolo considerando una valutazione dei rischi ambientali, dei potenziali rischi fisici, del potenziale di esplosione alle emissioni di composti organici volatili e del contatto diretto con il materiale

Mentre la produzione additiva per la prototipazione rimane utile, questa tecnologia è sempre più utilizzata anche per produrre prodotti commerciabili.

Nella fase di utilizzo della stampa, la categoria più appropriata da prendere in considerazione in base agli usi comuni dei materiali prodotti per produzione additiva riguardano le applicazioni come prodotti indossabili, giocattoli, prodotti per la casa e parti industriali.

Se il contenuto e la sicurezza dei prodotti di uso quotidiano sono un problema, le parti stampate in 3D possono porre maggiori preoccupazioni a causa della natura distribuita dell'uso, che cambia in base al processo produttivo adottato, e della conseguente mancanza di conoscenza della catena di approvvigionamento su come verranno utilizzati i materiali e le parti stampate finite risultanti.

Una soluzione a questo problema potrebbe essere uno schema di test del prodotto finito che valuta un prodotto in base alle sue prestazioni, in modo tale da consentire ad un operatore di stampa di identificare e controllare i problemi di sicurezza chimica del prodotto.

Le principali preoccupazioni per quanto riguarda lo smaltimento degli output della produzione additiva, non sono relative all'esposizione immediata al pericolo, ma sono relative all'impatto ambientale a lungo termine.

Anche se i rifiuti pericolosi devono, alla fine, essere trattati secondo le normative ambientali, questi trattamenti sono spesso costosi, ad alta intensità energetica e non eliminano completamente il rischio di contaminazione ambientale.

Infatti, la produzione additiva consente anche l'accesso a modelli di produzione distribuiti nei paesi in via di sviluppo, ma le opzioni di smaltimento dei rifiuti pericolosi non sono ampiamente disponibili in molti di questi paesi, specialmente quando i rifiuti vengono generati in luoghi non di facile raggiungimento.

Sebbene la configurazione del materiale durante e dopo il processo di stampa possa essere molto diversa, i criteri utilizzati per valutare la sicurezza e la sostenibilità sono molto simili.

Come raffigurato nella tabella 3 [8] dei requisiti, vengono considerate delle soglie per classificare le fasi di utilizzo della stampa su tre livelli di interesse.

Tabella 3 - Tabella dei requisiti per soddisfare le soglie di ogni livello per la fase di utilizzo della stampa. Nota: ppm = parti per milione; REACH = registrazione, valutazione, autorizzazione e restrizione delle sostanze chimiche; PCB = bifenili policlorurati; PBDEs = difenileteri polibromurati; µg/cm2/settimana = microgrammi per centimetro quadrato a settimana.

<b>Livello</b>	<b>Livello 2</b>	<b>Livello 1</b>	<b>Livello 0</b>
Passes cytotoxicity tests	Necessario	Necessario	Non Necessario
Passes irritation, sensitization, and intracutaneous reactivity tests	Necessario	Non Necessario	Non Necessario
Substances >100 ppm in material are not substances of very high concern (SVHCs) according to REACH standards	Necessario	Necessario	Non Necessario
Passes acute dermal toxicity tests	Necessario	Necessario	Non Necessario
Passes acute oral toxicity test	Necessario	Non Necessario	Non Necessario
Cadmium <100 ppm	Necessario	Non Necessario	Non Necessario
Mercury, lead, hexavalent chromium, PCBs, PBDEs <1,000 ppm	Necessario	Non Necessario	Non Necessario
Exterior surfaces do not release nickel in excess	Necessario	Non Necessario	Non Necessario
Dibutyltin, dioctyltin, pentachlorophenol, and azo-dyes are not use	Necessario	Non Necessario	Non Necessario

Le soglie di punteggio per ciascun criterio dipendono dalla tecnologia additiva utilizzata e ai materiali viene assegnato un punteggio complessivo compreso tra un livello 0 e un livello 2.

Un materiale di livello 2 attenua completamente la maggior parte di queste preoccupazioni, rendendolo un materiale di facile utilizzo.

Un livello 1 presenta alcune preoccupazioni per un operatore di tecnologia additiva e potrebbero essere necessari alcuni controlli tecnici o dispositivi di protezione individuale.

Infine, un materiale di livello 0 non può essere utilizzato con una tecnologia additiva senza adeguati controlli.

Queste soglie, in base ai materiali valutati, possono cambiare per riflettere in modo più accurato la reale gamma di tossicità del materiale durante la fase del processo di stampa. L'unico criterio di differenziazione è la creazione di rifiuti durante il processo di stampa; infatti, se non vengono prodotti rifiuti, un materiale otterrà automaticamente una classificazione di livello 2 per la fase di smaltimento.

I materiali o le stampe del processo di stampa inutilizzati dovrebbero essere riutilizzabili per la produzione additiva, attraverso la biodegradazione o il riciclaggio, in modo tale da soddisfare i criteri per una classificazione di livello 2.

La produzione additiva sta diventando sempre più multimateriale, il che rende il riciclaggio a flusso singolo più difficile.

Ciò suggerisce che il miglioramento della biodegradabilità sia l'opzione più praticabile.

Se un materiale non può essere biodegradato o riutilizzato in qualche modo, ma non è considerato un rifiuto pericoloso secondo le normative US EPA19 o California Department of Toxic 20 Substances Control (DTSC), può almeno essere tranquillamente messo in discarica per lo smaltimento e sarà considerato un livello 1.

I materiali di livello 0 sono considerati rifiuti pericolosi, secondo le stesse normative, o materiali che si degradano in prodotti di decomposizione pericolosi.

La Figura 7 [8], appunto, descrive in dettaglio questo processo decisionale in un diagramma di flusso.

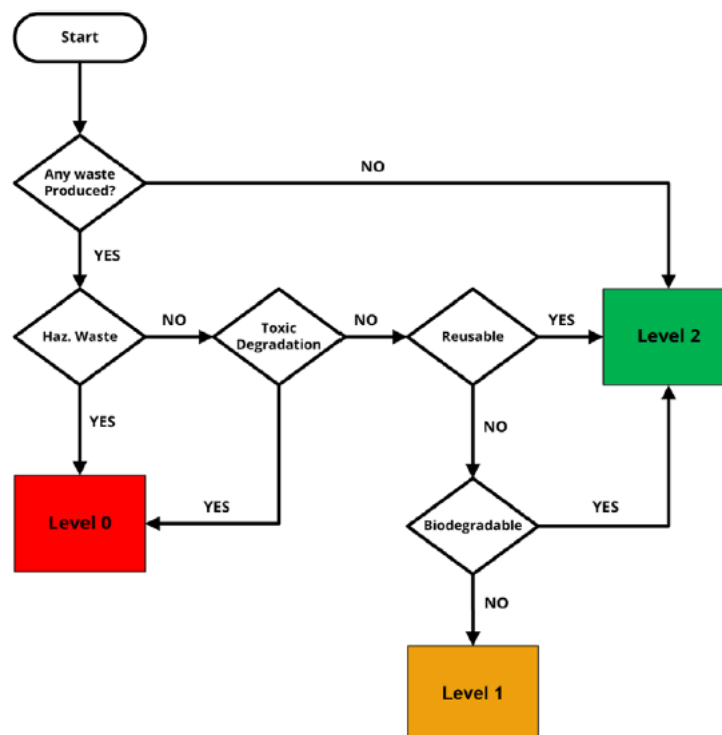


Figura 7 - Diagramma di flusso per il processo decisionale per lo smaltimento dei rifiuti del processo di stampa e fasi e criteri di smaltimento delle stampe. Haz. = pericoloso.

Una raccolta di ricerche su determinati percorsi di degradazione dei materiali può fornire una guida per la comprensione dei prodotti di decomposizione.

Ad esempio, i comuni prodotti termoplastici, come l'acrilonitrile-butadiene stirene e il polistirene, possono decomporsi in stirene cancerogeno nei giroscopi oceanici caldi.

Altre plastiche, come il polipropilene, assorbono composti tossici già presenti nell'ambiente, come i policlorobifenili (PCB), poiché si scompongono in microplastiche.



## 4.2 PANORAMICA DELLE BARRIERE ALLA DIFFUSIONE

L'obiettivo di questo capitolo è stato facilitare la trasparenza e la cooperazione nello sviluppo e nell'uso dei materiali prodotti mediante produzione additiva, riducendo al minimo i rischi e l'impatto ambientale.

Metriche più semplici e strumenti condivisi per comunicare e confrontare le opzioni miglioreranno lo sviluppo e l'utilizzo dei materiali additivi.

Di seguito le barriere attualmente presenti alla diffusione della produzione additiva distinte in due macro-tematiche [3].

Classificazione delle barriere per quanto riguarda il lato Tecnico:

- Macchinari
  - Alto costo di acquisizione;
  - Limite di dimensioni o della camera di costruzione;
  - Costo e velocità di produzione;
  - Distribuzione irregolare degli attuali servizi additivi.
  
- Materiale
  - Limite alla gamma di materiali;
  - Alto costo dei materiali;
  - Difficoltà nello sviluppo di una nuova lega;
  - Proprietà meccaniche dei materiali;
  - Limite alla riciclabilità dei materiali e delle parti.
  
- Design
  - Adattabilità dei designer al nuovo modo di pensare;
  - Mancanza di software professionale e integrato per la produzione additiva a livello aziendale;
  - Documenti e linee guida di progettazione;
  - Disegni limitati per uso domestico.
  
- Processi
  - Problemi con la ripetibilità del processo;
  - Monitoraggio e ispezione durante il processo;
  - Automazione di sistemi additivi;
  - Prestazioni incerte dei prodotti: stabilità, durata e affidabilità;
  - Qualità, precisione ed estetica dei prodotti finiti;
  - Efficienza dei costi di maggiori volumi di produzione;
  - Problemi con la post-elaborazione;

Classificazione delle barriere per quanto riguarda la Policy:

- Standard relativi a:
  - Attrezzatura;
  - Materiali;
  - Processi;
  - Modellazione;
  - Test e controlli di qualità.
  
- Regolamenti
  - Proprietà intellettuale;
  - Normative relative ai materiali (es. biocompatibilità).
  
- Istruzione
  - Indisponibilità di personale qualificato;
  - Mancanza di informazioni sull'accessibilità della tecnologia;
  - Educare progettisti e ingegneri sulla tecnologia;
  - Educare le comunità pubbliche e i singoli imprenditori a conoscere i potenziali usi e vantaggi della produzione additiva.
  
- Comportamenti
  - Resistenza al cambiamento/high-tech;
  - Consapevolezza e accettazione del consumatore;
  - Mancanza di supporto da parte del governo/delle borse di studio.

In questo capitolo, è stato descritto un quadro per valutare i potenziali rischi e gli impatti ambientali che integrano la valutazione del ciclo di vita di un materiale additivo dalla stampa in poi.

Nello sviluppo di questo quadro, troviamo che una valutazione completa di tutti gli impatti nelle scelte dei materiali additivi richiede una valutazione del ciclo di vita connesso a metodologie che tengano conto dei rischi diretti per le persone durante tutto il ciclo.

Le valutazioni forniscono informazioni sull'origine dei materiali di stampa e sui potenziali impatti globali, seguite da metodologie di rischio che forniscono l'identificazione e la valutazione del pericolo durante il processo di produzione dei materiali e quindi di stampa.

Infine, da un'analisi dei materiali, è evidente che gestire l'incertezza è una sfida, ma che l'analisi multilivello consente effettivamente di individuare le opportunità per migliorare un processo o un materiale.

## 5. CONFRONTO TRA LE FILIERE ADDITIVE E TRADIZIONALI

Le innovazioni tecnologiche potrebbero causare profondi cambiamenti all'interno delle organizzazioni e potrebbero influenzare i comportamenti e le relazioni tra gli stakeholder lungo le catene di approvvigionamento.

In tale contesto, la selezione della tecnologia diventa una decisione strategica che gioca un ruolo fondamentale nella configurazione e nella visione della supply chain.

La recente comparsa della produzione additiva per applicazioni di produzione per uso finale, implica trasformazioni strutturali radicali delle strutture della catena di approvvigionamento con corrispondenti vantaggi in termini di prestazioni, rispetto alla produzione tradizionale.

Per catturare gli impatti e le relative implicazioni dei due metodi di produzione per le operazioni dei fornitori di parti, dei fornitori di moduli e degli assemblatori finali, si evidenzieranno le differenze nelle caratteristiche della supply chain rispetto agli scenari di produzione additiva e tradizionale, in modo tale da concettualizzare e spiegare i potenziali impatti della produzione additiva sulle configurazioni standard della catena di approvvigionamento.

Infatti, capire come i fattori legati alle prestazioni influenzino le caratteristiche strutturali della produzione tradizionale e additiva, e concettualizzare il potenziale impatto della produzione additiva sulle supply chain tradizionali sarà oggetto di discussione di questo capitolo.

L'introduzione della produzione additiva nelle catene di approvvigionamento può essere affrontata come un problema di progettazione evolutiva: il modo in cui la tecnologia additiva viene inizialmente introdotta nelle operazioni, influisce sui requisiti per lo sviluppo futuro della tecnologia, nonché sulle opportunità che si aprono per la progettazione.

Negli ultimi anni, infatti, l'impatto della produzione additiva sulle prestazioni della supply chain ha iniziato ad essere oggetto di studio di molti ricercatori.

In generale, la produzione additiva sembra offrire molti vantaggi alle industrie, ma ha anche un impatto significativo sui processi e sull'integrazione della catena di approvvigionamento.

La produzione additiva promuove una rapida innovazione e modifica del prodotto, modificando il rapporto con il cliente e creando connessioni dinamiche.

Allo stesso tempo però, è necessaria una forte collaborazione con i fornitori poiché le caratteristiche e la qualità di materie prime sostenibili sono diventate fondamentali nel processo additivo.

Si considereranno e valuteranno gli effetti della produzione additiva sulle prestazioni della catena di fornitura, considerando diverse configurazioni di sistema con la modellizzazione sia della produzione tradizionale che di quella additiva per confrontarne l'efficienza.

Per quanto riguarda le sfide e le potenzialità della produzione additiva nella supply chain, si determineranno le interrelazioni specifiche del processo e tra processi all'interno della stessa.

## 5.1 CONFIGURAZIONI DELLA SUPPLY CHAIN

Per i fornitori di parti tradizionali specializzati, la produzione additiva potrebbe essere implementata per migliorare l'efficienza del processo, in quanto parti con volume basso e sporadico possono essere allocate alla tecnologia additiva, riducendo così l'impostazione e il cambio sulle linee di produzione tradizionale.

Ciò sarà particolarmente applicabile alle aziende che utilizzano processi di commessa o batching in cui si prevede che la produzione additiva sia efficace nel ridurre il numero di fasi della produzione tradizionale, eliminando gli scarti, il movimento dei materiali, le scorte di lavorazione in corso e i difetti.

La fabbricazione economica di lotti più piccoli potrebbe potenzialmente consentire la localizzazione della produzione nel punto di utilizzo spostando efficacemente il punto di disaccoppiamento degli ordini verso l'ubicazione dei clienti, consentendo così la reattività.

Per i produttori, la fabbricazione di parti precedentemente gestite da fornitori esterni può essere localizzata all'interno di impianti di assemblaggio e la produzione di pezzi di ricambio può essere ridistribuita più vicino alle sedi dei clienti, promuovendo l'efficienza in termini di riduzione delle scorte, carenza di parti, movimentazione dei materiali e costi di trasporto.

I problemi associati al bilanciamento della linea, alla gestione della capacità e ai colli di bottiglia possono essere eliminati.

In sostanza, molti rifiuti, intesi come scarti di materiale, vengono eliminati, favorendo un'operazione snella.

Tuttavia, la velocità e il throughput, inteso come capacità produttiva, dei processi additivi devono essere valutati in relazione ai tassi di domanda, poiché il throughput dei sistemi della tecnologia additiva è significativamente inferiore rispetto a quelli tradizionali.

Riducendo la distanza delle supply chain e fabbricando parti nel punto di utilizzo, la produzione additiva può, infatti, potenzialmente ridurre gli errori associati alla pianificazione e previsione della domanda poiché il numero di entità della catena di approvvigionamento coinvolte viene ridotto.

Infatti, lo spostamento della produzione più vicino al punto di utilizzo consente anche un migliore processo decisionale basato su informazioni più accurate dalle condizioni locali. La produzione additiva rompe le barriere tra architetture integrali e modulari per migliorare l'efficienza di produzione.

A livello di modulo, contenente un certo numero di parti di diversi fornitori, la produzione additiva porta ad un risparmio di processo per l'assemblatore di componenti, in quanto verranno eliminati molti passaggi associati alle tradizionali operazioni di assemblaggio.

Per quanto riguarda, invece, l'assemblaggio finale, la produzione additiva porta ad un risparmio di processo per l'assemblatore finale, considerando che le operazioni di assemblaggio tradizionale, che finora coinvolgono più fasi, possono essere ridotte con questa tecnologia che fabbrica prodotti complessi con diversi tipi di materiali.

Similmente ai vantaggi dell'assemblatore di moduli, è previsto anche un risparmio sul numero di operazioni che riguardano il ciclo di vita del prodotto all'interno della supply chain: ciò ridurrà efficacemente la struttura a livelli delle catene di approvvigionamento

tradizionali riducendo la produzione di prodotti complessi a un numero significativamente inferiore di fasi.

Sulla base di quanto detto, si analizzerà un quadro che cattura i potenziali impatti e implicazioni per i membri di una catena di approvvigionamento di produzione a tre livelli composta da fornitori di parti, moduli e assemblatori di prodotti finali.

Queste implicazioni sono state presentate in una matrice, raffigurata nella Figura 8 [9], di configurazione della catena di fornitura tradizionale e additiva.

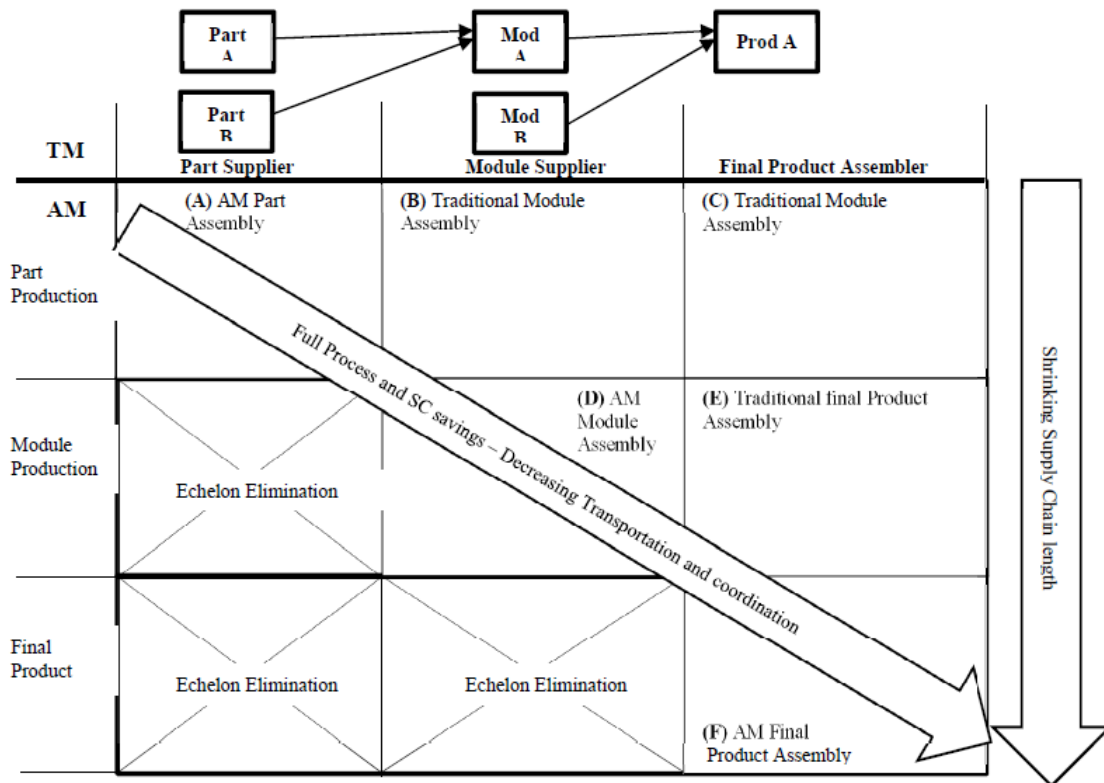


Figura 8 - Framework di configurazione della catena di approvvigionamento tradizionale e additivo.

L'asse orizzontale che rappresenta le entità della supply chain (fornitore di parti, moduli e assemblatore finale) disposte in sequenza, rappresenta uno scenario in cui due parti sono assemblate dal fornitore di moduli, e a turno, due moduli vengono assemblati dall'assemblatore finale.

Il focus è sulle operazioni di produzione e assemblaggio interne di un fornitore di parti (che rappresenta la parte A), un fornitore di moduli (che rappresenta il modulo A) e un assemblatore finale (che rappresenta il prodotto A).

L'asse verticale rappresenta tre scenari di produzione per ciascuna delle entità della catena di approvvigionamento.

Lo scenario uno rappresenta la produzione interna di parti additive per ciascuna delle entità della supply chain.

I fornitori di parti, moduli e gli assemblatori finali possono implementare internamente la produzione additiva per la fabbricazione di parti con implicazioni diverse per le loro operazioni di assemblaggio.

Lo scenario due rappresenta la produzione di moduli con la produzione additiva, in cui i fornitori di parti sono esenti e i fornitori di moduli implementano questa tecnologia per combinare parti precedentemente assemblate in un modulo di una build.

Nello scenario tre, l'assemblatore finale distribuisce la produzione per realizzare un prodotto finale.

I fornitori di parti possono distribuire la produzione additiva in modalità standalone per la fabbricazione di parti a basso volume: ciò aumenta l'efficienza dell'operazione in termini di eliminazione dei rifiuti da allestimenti ed in termini di movimentazione dei materiali e del loro utilizzo.

Quindi, l'implementazione della produzione additiva da parte di un fornitore di componenti in modalità standalone potrebbe potenzialmente generare efficienze, velocità e flessibilità entro i confini di un impianto di produzione, con un conseguente risparmio di processo.

Questo scenario è rappresentato dalla cella "A" in figura, in cui si rappresenta uno scenario dove la parte in questione è completamente fabbricata mediante produzione additiva.

Le due celle sotto contrassegnate con "x" non sono applicabili perché il fornitore della parte non ha la competenza per produrre moduli e prodotti finali.

Invece, la cella "B" nella figura è etichettata come "assemblaggio del modulo tradizionale" poiché la produzione additiva viene distribuita dal fornitore del modulo per fabbricare parti che verranno tradizionalmente assemblate con altre parti per costruire il modulo.

Questa è una configurazione combinatoria in cui la produzione additiva coesiste insieme ai processi tradizionali per produrre un modulo.

Analogamente al fornitore di parti, le apparecchiature additive in questo scenario sono in grado di elaborare singoli materiali per la produzione di parti.

Ciò si traduce in un'integrazione verticale della produzione di parti da parte del fornitore del modulo, che può essere vantaggiosa per piccoli volumi, perché i bassi volumi indeboliscono i poteri di contrattazione nella negoziazione di sconti su alti volumi.

Nella cella "D", il fornitore di moduli utilizza la produzione additiva internamente per la produzione del modulo "A" in un'operazione di costruzione, da cui l'etichetta "assemblaggio additivo".

In questo scenario, viene impiegata una progettazione integrale del prodotto, che attraversa i confini di parti separate precedentemente provenienti da fornitori diversi, con lo stesso materiale o eventualmente con materiali diversi, ottenendo il consolidamento delle parti a livello del modulo.

Nelle celle "C" ed "E", l'assemblatore finale distribuisce la produzione additiva in modalità combinatoria per la produzione di parti e moduli, precedentemente acquistati da fornitori esterni.

La catena di approvvigionamento ed il risparmio di processo si ottiene in termini di eliminazione degli oneri logistici e di coordinamento dei costi relativi all'inventario per promuovere l'efficienza. Per la cella "F", si vede il caso più estremo, dove si ottiene il consolidamento a livello del prodotto finale (inter-modulo): in questo scenario, le capacità dell'apparecchiatura additiva devono avere caratteristiche molto specifiche inerenti all'elaborazione di più materiali.

In base a questo scenario si può dire che i vantaggi in termini di prestazioni derivanti dall'implementazione della produzione additiva dipendono da diversi fattori come l'entità della supply chain e la modalità in cui viene implementata.

È probabile che altre operazioni rendano in misura minore su queste dimensioni prestazionali, a causa della presenza di elementi tradizionali.

Inoltre, è necessario misurare empiricamente i livelli di prestazione effettivi delle operazioni nei processi di risparmio della supply chain per delinearne le capacità additive sui diversi livelli della struttura del prodotto.



## 5.2 TECNOLOGIE A CONFRONTO: VOLUME E COMPLESSITÀ

Oggetto di questo paragrafo sarà analizzare il grado di volume, complessità e personalizzazione di un prodotto additivo rispetto ad un prodotto fabbricato tradizionalmente.

Si vedrà, dove la produzione additiva può dominare la catena di approvvigionamento o, in alternativa, non può competere con i metodi convenzionali.

La produzione ad alto volume per favorire le economie di scala è stata l'obiettivo principale delle industrie manifatturiere tradizionali.

Ciò è particolarmente vero per la produzione di massa, basata su parti caratterizzate dalla loro semplicità e mancanza di personalizzazione.

I metodi convenzionali come lo stampaggio a iniezione dominano ancora la produzione, ma il vantaggio di complessità offerto dalla produzione additiva ha fornito l'opportunità di "colpire due piccioni con una fava" con la possibilità di eliminare la forgiatura e il processo di giunzione stampando parti complete in un'unica stampa.

Il prodotto fabbricato con metodi convenzionali avrà generalmente una complessità e una personalizzazione limitata; tuttavia, con la produzione additiva i produttori possono ottenere un elevato grado di complessità allo stesso costo.

L'introduzione della produzione additiva nel settore manifatturiero è iniziata con una produzione a basso volume per la prototipazione rapida, con la stereolitografia.

Tuttavia, ora la produzione additiva sta andando verso un'ottica di produzione diretta di componenti.

Considerando il costo di fabbricazione di una piccola leva di plastica utilizzando la fusione a letto di polvere rispetto alla produzione convenzionale di stampaggio a iniezione, si vede che per un volume di produzione inferiore a 10.000, la produzione additiva aveva un costo unitario ridotto rispetto allo stampaggio a iniezione, mentre la produzione tradizionale domina finanziariamente la regione di produzione di massa. [10] La conclusione da trarre è che il volume di produzione è un fattore di importanza indipendente, mentre personalizzazione e complessità sono intercambiabili in termini di impatto.

La produzione additiva ha creato l'opportunità per la semplificazione della catena di approvvigionamento ed è stata implementata con successo per produzioni di unità singole e volumi molto bassi in diversi settori.

Tuttavia, nella produzione additiva, a parte le imperfezioni geometriche, si sono problemi che non possono essere rilevati attraverso i tipici test meccanici, come la post-elaborazione e la finitura superficiale interna indesiderata.

Quindi, il volume di produzione è un fattore di importanza indipendente, mentre personalizzazione e complessità sono intercambiabili in termini di impatto.

I requisiti chiave per la penetrazione della produzione additiva in futuro nel più ampio mercato commerciale includono un'elevata stabilità del processo, un database contenente le proprietà dei materiali additivi, processi di controllo della qualità in linea, certificazione continua e fornitura di regole di progettazione.

Inoltre, anche l'eterogeneità dei materiali e l'affidabilità strutturale sono fattori essenziali da considerare.

### 5.3 EFFETTI SULLA GREEN SUPPLY CHAIN

Il confronto ambientale mostra che la produzione additiva ha un elevato potenziale sostenibile rispetto ai metodi sottrattivi.

Il modello analizzato, attraverso il confronto di diverse soluzioni, permette di selezionare la migliore tecnologia economica e ambientale [11].

In particolare, l'attenzione si è spostata da un'ottimizzazione ambientale locale alla considerazione dell'intera filiera, consentendo lo sviluppo delle cosiddette filiere sostenibili e green.

Per raggiungere lo stato di green supply chain, la selezione della tecnologia di produzione è fondamentale; tale scelta può essere affrontata come uno dei processi decisionali più impegnativi, in quanto riguarda l'intera filiera.

Le prestazioni di un sistema o di un'intera filiera sono strettamente dipendenti dallo sviluppo di nuove tecnologie di produzione.

In particolare, per la sua natura flessibile, la produzione additiva permette di modificare velocemente il design del prodotto e di produrre piccole quantità.

Queste caratteristiche potrebbero indurre i gestori della catena di approvvigionamento a lasciare la produzione massiccia e supportare la produzione distribuita.

Per tali motivi, la produzione additiva è considerata una potenziale tecnologia dirompente per le catene di approvvigionamento e potrebbe rivedere completamente o addirittura creare una configurazione di approvvigionamento completamente nuova.

Sono state considerate diverse configurazioni di filiera, al fine di testare la fattibilità della produzione additiva combinata con diverse strutture della catena di approvvigionamento.

La figura 9 [11] mostra due soluzioni di configurazione della supply chain:

- una produzione tradizionale in un unico luogo (Centralized Supply chain);
- una soluzione di produzione distribuita (Decentralized Supply chain).

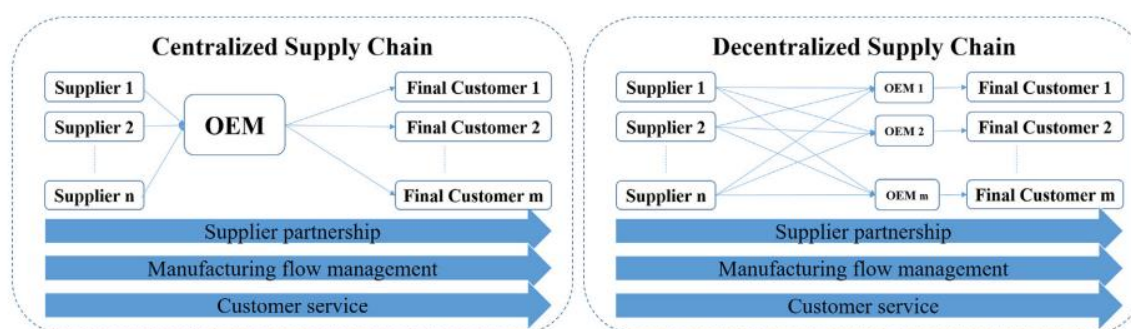


Figura 9 - Diverse strutture della filiera

In entrambi i casi si considera una filiera a tre scaglioni, composta da un Fornitore, un Original Equipment Manufacturer (OEM) e il Cliente Finale.

La struttura centralizzata è caratterizzata da un unico OEM, che gestisce e controlla l'intera produzione.

D'altra parte, la configurazione decentralizzata mostra diverse sedi OEM attrezzate per gestirne la corretta produzione: in tal caso, la fase di produzione è frammentata e ogni struttura è situata più vicino al cliente finale.

Un passaggio cruciale per lo sviluppo del modello consiste nell'individuazione di metriche idonee, che dovrebbero portare alla scelta migliore.

Una revisione contestualizzata della letteratura sottolinea che i leader del settore manifatturiero dovrebbero considerare molti fattori nel determinare se la produzione additiva sia adatta alle loro attività.

Di conseguenza, nella tabella 4 [11] sono state individuate metriche idonee per valutare la sostenibilità della tecnologia additiva, insieme ad una definizione adeguata e agli aspetti della green supply chain.

Tabella 4 - Key Performance Indicators proposti

Sustainability perspective	Supply Chain Level	KPIs	Description and Measurement unit
<b>Economic</b>	Supplier	On Time Delivery	Ratio between the number of on-time deliveries and the total deliveries [%]
	OEM	Capacity utilization	Real production capacity over maximum production capacity [%]
		Unit product cost	Fixed and variable costs associated with the production of a good [V/unit]
		Processing waste	Cost due to the amount of materials wasted during the manufacturing phase [V/unit]
	Supply chain	Holding cost	Economic value of the amount of stocks [V/year]
		Supply Chain Lead Time	Time from the moment the customer places an order to the moment it is ready for delivery [days]
		Cash to cash	Time between the business pays cash to its suppliers and receives cash from its customers [days]
<b>Environmental</b>	OEM	Cash to cash	Emissions connected to the waste material [kgCO <sub>2</sub> /unit]
		CO <sub>2</sub> Manufacturing Emission	CO <sub>2</sub> emissions of a product provided by the supply chain [kgCO <sub>2</sub> /unit]
	Supply chain	Transport Emission	CO <sub>2</sub> emissions associated to the transport activities [kgCO <sub>2</sub> /year]

Tutti i KPI (Key Performance Indicators) ambientali supportano l'adozione della produzione additiva decentralizzata, che risulta sempre la migliore tecnologia.

Infatti, la tabella 5 seguente mostra come la soluzione decentralizzata della produzione additiva raggiunga il punteggio massimo indipendentemente dal volume di produzione.

Tabella 5 - Risultati dei Key Performance Indicators

KPIs	TM mean	ACM mean	AMD mean	TM dev. std	AMC dev. Std	AMD dev. std
On time Delivery	100%	100%	100%	0.0%	0.0%	0.0%
Capacity utilization	80%	77%	76%	0.2%	0.2%	0.2%
Unit product cost	21.31	87.02	89.62	0.05	0.25	0.24
Processing waste - economic	4.81	3.30	3.30	0.00	0.00	0.00
Holding cost	40949.48	109559.81	91998.89	642.37	498.03	141.62
Supply Chain Lead Time	11.71	9.18	4.41	0.23	0.22	0.06
Cash to cash	36.08	35.56	34.41	0.23	0.22	0.06
Processing waste - environmental	3.55	0.20	0.20	0.00	0.00	0.00
CO2 Manufacturing Emission	9.17	7.22	7.22	0.00	0.00	0.00
Transport Emission	65.92	54.65	38.01	0.16	0.13	0.11

Quindi, dal punto di vista ambientale, la produzione additiva conferma di avere un potenziale rispetto alla produzione convenzionale, come si vede nella tabella 6 [11].

Tabella 6 - La migliore soluzione variando i pesi ambientali

<b>Weight – Environmental</b>	<b>SL 65% - 98%</b>
<b>10%</b>	TM
<b>30%</b>	TM
<b>50%</b>	AMD
<b>70%</b>	AMD
<b>90%</b>	AMD

Inoltre, in un ambiente molto flessibile con un livello di servizio molto richiesto, l'alternativa di decentramento risulta essere la soluzione migliore.

In generale, la produzione additiva offre un ottimo supporto per le prestazioni della catena di approvvigionamento e offre buoni risparmi sui tempi di consegna e sulle scorte medie. Tuttavia, il volume di produzione influenza i risultati economici e la competitività della produzione additiva in termini di costi di produzione è ancora limitata.

## 6. IMPLEMENTAZIONE E METODI DI APPROVVIGIONAMENTO DELLA PRODUZIONE ADDITIVA NELLE SUPPLY CHAIN

Nella maggior parte delle catene di approvvigionamento, l'applicazione della produzione additiva, come tecnologia completamente integrata nelle dinamiche aziendali, è ancora lontana dall'essere comune.

Le tecnologie additive, però, hanno avuto un forte sviluppo negli ultimi decenni e si prevede che questa tendenza continuerà; infatti, molte applicazioni industriali mostrano chiaramente che la produzione additiva è in grado di superare e sostituire processi tradizionali, soprattutto in settori in cui i prodotti sono dotati di un'elevata complessità geometrica.

In questo capitolo, dopo una revisione delle principali tecnologie, strumenti di progettazione, vincoli e opportunità forniti dall'implementazione della produzione additiva, si analizzerà un approccio sistematico a supporto del processo decisionale per lo sviluppo di nuovi prodotti e per la riprogettazione di parti esistenti.

Lo scopo di questo capitolo è superare i limiti delle valutazioni d'impatto della produzione additiva integrando la potenziale riduzione delle scorte di materiale attraverso l'adozione della tecnologia additiva nella produzione e sottolineare le possibili implicazioni per i processi della catena di approvvigionamento.

Si analizzerà un modello di valutazione dinamico che valuta l'adozione della produzione additiva attraverso il modello di diffusione di Bass per fornire risultati interessanti sia per i professionisti che i ricercatori.

Combinando i vantaggi dei precedenti approcci di produzione come l'artigianato e la produzione su larga scala, nonché la produzione di personalizzazione di massa, la produzione additiva ha il potenziale per cambiare le catene dei processi di produzione contemporanei, i modelli di business e le relazioni con gli utenti, producendo prodotti unici e personalizzati.

La produzione additiva, infatti, altera il modo in cui opera la catena di approvvigionamento, imponendo un nuovo approccio manageriale alla supply chain che dovrebbe essere riesaminato e sviluppato per trarne vantaggio.

Pertanto, la ripartizione delle spese generali sui singoli prodotti cambierà per i metodi di produzione additivi, in quanto sono metodi ad alta intensità di tecnologia e con una richiesta di manodopera ridotta.

Ciò che è chiaro è che la produzione additiva cambierà le organizzazioni manifatturiere: il cambiamento avverrà sia a livello tecnico, dove sarà necessaria la riqualificazione e la familiarizzazione con la nuova tecnologia, sia a livello manageriale.

La capacità di introdurre questa nuova tecnologia in modo coerente ed efficiente sarà necessaria quando i sistemi di tecnologie additive saranno ben distribuiti sul mercato;

infatti, per prodotti altamente personalizzati, indirizzati alla produzione di massa, sarà necessario ripensare alla raccolta dei dati e alle modalità di progettazione.

A seconda dello scenario della catena di approvvigionamento scelto, sarà necessario prendere molte decisioni sull'acquisto di apparecchiature additive o sull'acquisto di componenti additivi dai fornitori, andando ad influenzare così la logistica e la distribuzione.

## 6.1 IMPATTO DELLA PRODUZIONE ADDITIVA SUI METODI DI GESTIONE DELLA SUPPLY CHAIN

La capacità della produzione additiva di appropriarsi del valore dalle pratiche della gestione della supply chain deriva dalla sua flessibilità di produzione, infatti, la produzione additiva avrà un impatto su diversi metodi di gestione in modo diverso.

Lo sviluppo di una pratica di filiera adeguata all'appropriazione del valore ha portato all'analisi dell'implementazione della produzione additiva su una serie di concetti di filiera. [12]

Tra cui:

- Lean;
- Agile;
- Internet e commercio elettronico.

La produzione additiva influenzerà la meccanica della metodologia lean, nonché quindi la produzione di parti e l'eliminazione degli sprechi nella filiera.

L'applicazione delle tecniche additive conterrà una serie di vantaggi per la produzione just-in-time (JIT), che includono:

1. Filiera dematerializzata.  
Il requisito principale per la produzione additiva è disporre di dati CAD tridimensionali adeguati da cui produrre la parte o il prodotto.
2. Vero just-in-time.  
Poiché la macchina additiva richiede solo dati CAD tridimensionali e materie prime per produrre una parte, l'applicazione della produzione additiva potrebbe comportare una riduzione della distribuzione del materiale e dei costi di stoccaggio per i lavori in corso.
3. Riduzione dei tempi di allestimento, cambio formato e numero di assemblaggi.  
Va sottolineato che la produzione di parti tramite produzione additiva cambierà il paradigma manifatturiero, si passerà dalla fitta presenza di manodopera operante sui macchinari che costituisce una grande parte del costo del pezzo a ad una modalità di produzione, che richiede la presenza di un minor numero di operatori, in cui l'onere del costo viene trasferito principalmente alla tecnologia o in particolare alla macchina.

Altro fattore trainante del paradigma Lean è la riduzione degli sprechi nella catena di approvvigionamento.

Considerare la filiera digitale e l'integrazione con internet comporterà lo scambio di dati tra designer e produttori: abilitando la catena di approvvigionamento digitale e la produzione additiva nello stesso sistema di produzione, infatti, gli attuali sistemi di produzione verranno capovolti.

In primo luogo, questo avrà un effetto drastico sul costo della logistica, in quanto potrebbe non essere più necessario spedire merci, né a livello internazionale né nazionale, grazie alla possibilità di produzione in luoghi molto più vicini al consumatore finale, sfruttando i file STL.

Ciò influirà sui costi di produzione e consentirà quindi alle catene di approvvigionamento di adottare metodologie snelle per ridurre ulteriormente gli sprechi.

L'impatto sulle catene di approvvigionamento agili non sarà meno profondo e gli effetti osservati sulle catene di approvvigionamento snelle influenzeranno anche il paradigma agile.

Le catene di approvvigionamento agili lavorano su un diverso insieme di metodologie operative.

Il concetto agile si concentra sulla compressione dei tempi di consegna, piuttosto che sull'eliminazione degli sprechi: è la variabilità della domanda dei consumatori che definisce il motivo del paradigma della produzione agile.

Per questi motivi il paradigma agile è adatto a prodotti che hanno un ciclo di vita breve, come i beni alla moda, a differenza della produzione snella che si focalizza sulla produzione di materie prime.

Il driver per l'implementazione di successo di una catena di approvvigionamento agile sarebbe quindi l'informazione di mercato e la previsione della domanda.

Inoltre, la produzione additiva e internet offrono molti vantaggi rispetto ai tradizionali concetti di filiera.

La capacità di gestire i dati chiave, come i file CAD necessari per la produzione, sarà un fattore chiave nell'implementazione della tecnologia additiva.

Internet dovrebbe diventare un fattore chiave in modo tale da poter essere garantite le velocità di trasferimento dei dati e l'integrità dei dati.

Da ciò, la produzione additiva potrebbe realizzare il primo paradigma di supply chain veramente flessibile e just in time per rispondere con facilità alla domanda dei clienti e ai cambiamenti nel gusto e nel design.

L'impatto per la comunità della personalizzazione di massa sarà che quei prodotti difficili da produrre, o perché il mercato era troppo piccolo (da una a poche migliaia di unità) o il design era troppo complesso, ora saranno producibili in maniera più facile e semplice.

In parole povere, nessun mercato sarà troppo piccolo, nessuna parte troppo complessa e la produzione sarà in grado di offrire una soluzione completa al cliente in brevi tempistiche e a costi ragionevoli.



## 6.2 PROGETTAZIONE DEL PRODOTTO ADDITIVO PER UN USO INDUSTRIALE

Le macchine additive, oggi, non si limitano più alla produzione di prototipi, ma vengono implementate anche per sviluppare parti finali complesse.

In una fase iniziale, ci sono molti ed eterogenei aspetti che un designer deve considerare quando decide di adottare la produzione additiva.

Fondamentalmente, i requisiti di progettazione devono essere valutati rispetto alle possibilità e ai vincoli dati dalla tecnologia di produzione.

In questo contesto, la disciplina del Design For Manufacture And Assembly ha un ruolo importante.

DFMA è l'unione di due metodologie, ovvero Design for Manufacturing, che è il design per facilitare la fabbricazione delle parti che formeranno un prodotto, e Design for Assembly, che mira al miglioramento del design del prodotto per facilitare l'assemblaggio.

In altre parole, il DFMA si basa su linee guida per aiutare i designer a sviluppare prodotti in modo da facilitare la produzione e l'assemblaggio, riducendo così i costi e i tempi di produzione.

Nella pratica industriale, l'assenza di schemi e linee guida DFMA chiari spesso si traduce in un uso ancora occasionale della produzione additiva in fase di progettazione.

Pertanto, l'obiettivo principale di questo paragrafo è fornire un metodo per supportare i progettisti, a comprendere meglio le potenzialità offerte dalle tecnologie additive in determinati contesti progettuali. [13]

In particolare, si mira a formulare linee guida per capire quanto è potenzialmente conveniente utilizzare la produzione additiva.

Il primo passo di un processo di progettazione è la raccolta di dati sul prodotto da sviluppare.

Le informazioni nell'ambito additivo si riferiscono all'intero ciclo di vita.

Lo sviluppo di una analisi di fattibilità viene tradizionalmente affrontata in questo ordine:

- a) identificare il problema essenziale;
- b) stabilire la struttura funzionale;
- c) ricerca delle strutture lavorative;
- d) combinare e consolidare la ricerca in flussi concettuali;
- e) valutare in base a criteri economici.

Di solito, questi passaggi vengono affrontati completamente se si considera un nuovo design del prodotto.

In caso di riprogettazione, è già prevista una soluzione progettuale di partenza.

La riprogettazione o lo sviluppo di un nuovo prodotto con tecniche additive è vantaggioso se porta a un risparmio di denaro.

Viene introdotto, quindi, un indice di conformità (CI) per misurare la compatibilità e l'idoneità della produzione additiva per un prodotto in esame.

Questo indice è definito come nell'equazione 5 [13]:

Equazione 5 - Indice di conformità (CI)

$$CI = 100 * \frac{\sum_{i=1}^{15} A_i * Q_i}{\sum_{i=1}^{15} Q_i}$$

Per calcolare l'indice, vengono fatte delle domande "Qi", specifiche rispetto all'oggetto in analisi, al progettista e ad ogni domanda si assegna un valore "Ai" da 1 a 5 in modo da assegnare livelli di importanza per ogni caso di studio.

Viene quindi calcolato un punteggio come media pesata dei valori raccolti.

Infine, i valori vengono normalizzati dividendo il risultato per 5 e moltiplicando per 100 per ottenere l'indice sotto forma di percentuale.

L'indice di conformità fornisce una misura relativa della possibilità di continuare con il processo e cercare una nuova soluzione basata sulla produzione additiva.

La soglia per l'indice dipende da molti fattori e non è possibile fissare un valore standard. Nel caso in cui il progettista concluda che il prodotto finale possa trarre vantaggio dalla produzione additiva, si può passare alla fase successiva, altrimenti si cercherà di ottimizzare ulteriormente la soluzione esistente nel contesto delle tradizionali tecnologie di produzione.

Quindi, è possibile concludere che ci sono driver di progettazione chiave, vale a dire l'alto livello di personalizzazione, la forma complessa e la necessità di strutture reticolari, che rendono la scelta per la produzione additiva adatta o quasi obbligatoria.

Tuttavia, emergono situazioni intermedie, la cui opportunità della produzione additiva può essere valutata adeguatamente dal metodo.

### 6.3 INFLUENZA DELLA DIFFUSIONE ADDITIVA SUL PROCESSO DELLA SUPPLY CHAIN

La domanda a cui si andrà a rispondere in questo paragrafo è "In che modo la diffusione della produzione additiva avrà un impatto sull'inventario dei materiali?"

Si mira a simulare la riduzione delle scorte di materiali attraverso l'adozione della produzione additiva nell'industria manifatturiera e a sottolineare implicazioni per le filiere.

È stato analizzato un punto di vista più olistico e generale, da cui è stata valutata una simulazione della dinamica del sistema, combinando il modello di diffusione di Bass con un Materials Inventory Model. [14]

Nel complesso, la decisione di adottare una nuova tecnologia dipende dai benefici che si ottengono incorporando nuove soluzioni tecniche, funzionali o estetiche, per raggiungere il posizionamento competitivo dell'azienda.

Da un punto di vista teorico, rispetto agli approcci della tradizionale produzione sottrattiva, la produzione additiva utilizza sicuramente meno materiale nel processo di produzione: per un determinato prodotto, la produzione additiva richiede meno materia prima.

Ciò ha implicazioni per la gestione dell'inventario, per il trasporto, per l'immagazzinamento e per gli acquisti, poiché quantità di ordini inferiori significano meno trasporti e requisiti di spazio inferiori per le materie prime.

Anche se confrontato con gli approcci di produzione tradizionali come lo stampaggio a iniezione, la produzione additiva può comunque produrre potenziali risparmi sui materiali durante il processo di produzione.

Infatti, gli strumenti utilizzati per i processi produttivi interni all'azienda possono essere realizzati anche mediante produzione additiva.

La produzione additiva può mettere in discussione i principi consolidati di gestione delle operazioni, in quanto il passaggio alla produzione in linea di parti personalizzate può offrire alle aziende numerose opportunità competitive.

Bass (1969) ha stabilito un modello di diffusione basato sul presupposto di base che la tempistica dell'acquisto iniziale di un cliente è correlata al numero di acquirenti precedenti.

Il modello implica una crescita esponenziale degli acquisti iniziali fino ad un picco e quindi un conseguente decadimento.

Ciò si tradurrà in una significativa funzione di crescita a forma di S degli utenti totali.

Il tasso di adozione (ART), come vediamo nella formula 1, è composto dall'adozione dalla pubblicità (fonti esterne) più dall'adozione dal passaparola (esposizione sociale e imitazione), in modo tale che

"Le innovazioni che sono percepite dagli individui come dotate di un maggiore vantaggio relativo, compatibilità e simili, hanno un tasso di adozione più rapido" (Rogers 1983).

Collegato a tale affermazione si è ipotizzato che maggiore è l'utilità della produzione additiva, e più veloce è il suo tasso di adozione (vedi equazione (16) [14]).

Equazione 6 - Tasso di adozione della produzione additiva

$$AR_t = aP_t + \frac{(i + B_t) * P_t A_t \left[ \frac{Users}{Year} \right]}{N}$$

Più in dettaglio, ciò significa che maggiore è il potenziale risparmio di materiali ottenuto da produzione additiva, minore è l'utilizzo di materiali per unità, che a sua volta aumenta l'adozione dal passaparola.

Poiché l'adozione dal passaparola alimenta il tasso di adozione, quest'ultimo accelererà, il che aumenterà successivamente il risparmio di materiali.

Nel modello si presume che un impatto positivo della produzione additiva sull'inventario dei materiali ha, a sua volta, un impatto rafforzante sull'adozione della tecnologia.

Nella figura 10 [14] è illustrata un'analisi di scenario in relazione a tale ipotesi, ottenuta variando la variabile "Utilità Percepita".

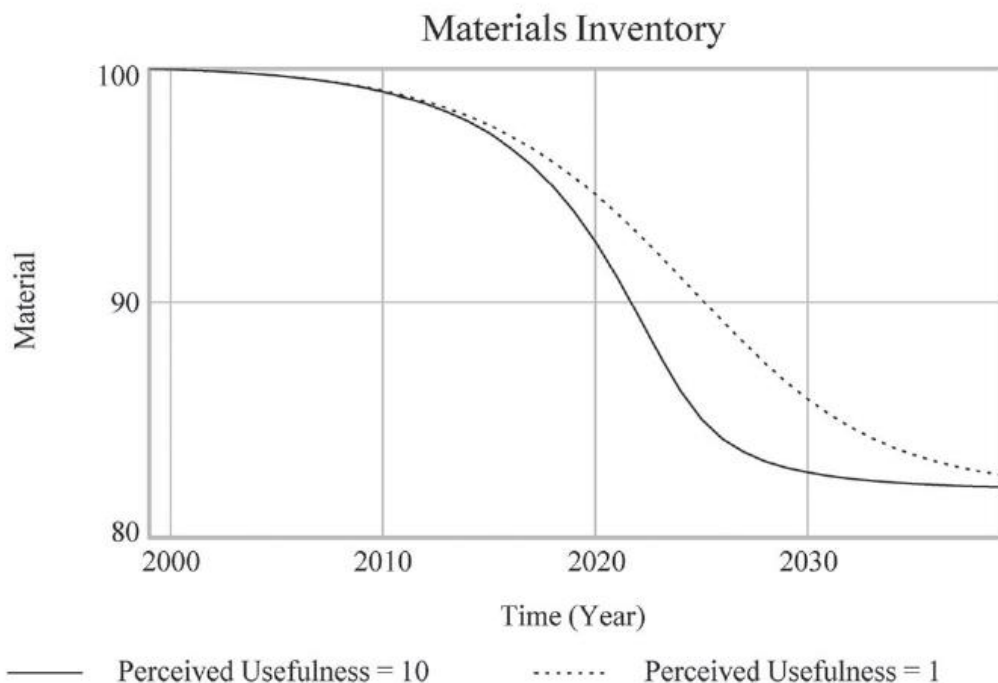


Figura 10 - Inventario materiali nel tempo analisi di scenario

Nel primo caso è stato ipotizzato un impatto molto basso (UP=1), mentre nel secondo è stato modellato un impatto maggiore (UP=10).

Il comportamento del modello mostra che se i potenziali adottatori della produzione additiva sono effettivamente più inclini ad adottare la tecnologia a causa dei suoi impatti positivi sull'inventario dei materiali, ciò aumenta solo il tasso di adozione ma non riduce l'inventario dei materiali al di sotto di un livello che avrebbe raggiunto a comunque una fase futura.

Il risultato più importante della simulazione, in base allo sviluppo nel tempo dell'inventario dei materiali, è visibile nella figura a sinistra ed è il risultato della simulazione Monte Carlo, che comprende 2000 esecuzioni e una variazione delle variabili del fattore di risparmio e del relativo impatto sull'inventario.

Nella figura 11 possono essere visualizzati quattro percentili codificati a colori che includono cumulativamente il 50% (centro, trasparente), il 75% (grigio chiaro), il 95% (grigio scuro) e il 100% (nero) delle esecuzioni di simulazione.

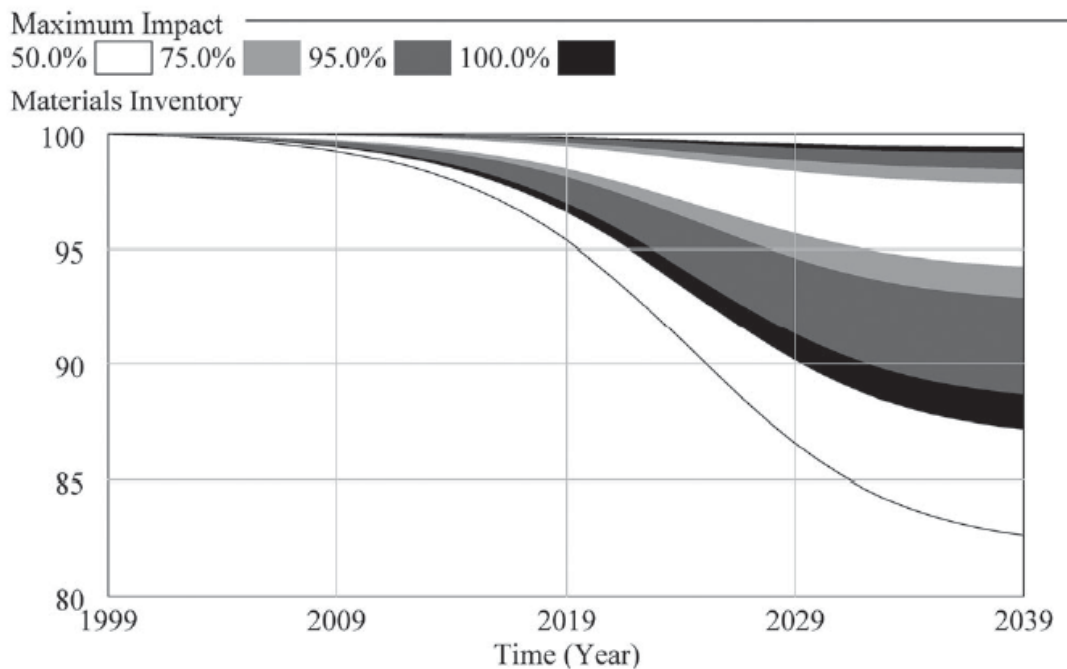


Figura 11 - Inventario dei materiali nel tempo

Ciò significa che il 50% delle esecuzioni della simulazione, rappresentata dall'area trasparente al centro del grafico, convergeva ad una riduzione dell'inventario dei materiali del 2-6%.

In ogni caso, è probabile che la riduzione avvenga gradualmente, in corrispondenza dei risultati statistici della simulazione (Tabella 7), i quali restituiscono un valore mediano finale dell'inventario dei materiali di 96,07, il che significherebbe una potenziale riduzione diretta del 3,93% dell'inventario dei materiali nell'industria manifatturiera.

Tabella 7 - Materials Inventory over time.

<b>ANNO</b>	<b>2009</b>	<b>2019</b>	<b>2029</b>	<b>2039</b>
<b>Meiana</b>	100	98.96	97.03	96.07
<b>Media</b>	100	98.86	96.71	95.67
<b>Deviazione standard</b>	0	0.701	2.021	2.642

Questo potrebbe sembrare sorprendente, considerando l'elevato potenziale di risparmio di materiale (fattore di risparmio) menzionato in precedenza, ma in primo luogo, è necessario tenere conto del fatto che la proporzione della produzione attenua l'effetto e, in secondo luogo, questo modello include solo impatti diretti come l'efficienza dei materiali nel processo di produzione e le ottimizzazioni del design del prodotto.

Secondo il modello, gli impatti della produzione additiva sulle scorte di materiali fino all'anno 2019 sono solo marginali, mentre la maggior parte della riduzione totale avverrà nel periodo 2019-2039.

I risultati chiave ruotano attorno a due aspetti principali, in primo luogo l'inventario delle materie prime e i relativi processi della catena di approvvigionamento e, in secondo luogo, la diffusione della produzione additiva e la potenziale influenza dell'utilità percepita sull'adozione della tecnologia.

Secondo i risultati, la produzione additiva ha il potenziale per ridurre direttamente le scorte di materie prime di circa il 4%, mentre la maggior parte di questa riduzione avverrà nel prossimo decennio.

Questo può essere di particolare interesse per i professionisti che mirano a migliorare l'uso della produzione additiva in un ambiente di produzione reale.

Ciò, tuttavia, è in accordo con l'osservazione generale secondo cui la produzione additiva ha avuto un inizio sorprendentemente lento e che è stato applicato prevalentemente in segmenti industriali di nicchia durante i suoi primi anni.

Quindi, collegando il modello di inventario al modello di diffusione, partendo dal presupposto che una riduzione dell'utilizzo dei materiali aumenterà l'utilità percepita della tecnologia, si è visto che l'utilità percepita avrà un effetto positivo sull'adozione della tecnologia e accelererà il suo impatto sul processo di filiera delle materie prime.

## 7. PRODUZIONE ADDITIVA SU LARGA SCALA

Negli ultimi anni si è verificato un aumento dell'utilizzo della tecnologia additiva per la fabbricazione di prodotti per uso finale, ma un uso massiccio della tecnologia in termini di velocità, costi e qualità, che è accettabile dal consumatore generale, non è ancora ampiamente esistente oggi.

La produzione additiva si è affermata come uno strumento tecnologico di grande interesse per adattare in modo rapido e flessibile il sistema produttivo alle nuove esigenze produttive e agli input del mercato; infatti, le richieste sempre più complesse del mercato hanno incoraggiato designer e tecnologi ad avvicinarsi alla rivoluzione della produzione additiva, nata per aiutare e supportare gli ingegneri nella loro concettualizzazione.

L'utilizzo di questa tecnologia rappresenta uno dei principali fattori abilitanti per la completa digitalizzazione del processo produttivo, portando inevitabilmente a diversi cambiamenti nella progettazione e gestione del prodotto e del processo.

L'introduzione della tecnologia additiva nei processi produttivi ha caratterizzato il cambiamento e il rinnovamento di molti settori industriali.

Il vantaggio competitivo è definito dalla configurazione di un nuovo modello di produzione caratterizzato da produzione adattiva, con elevati livelli di personalizzazione, riduzione dei costi e miglioramento del time-to-market.

Vengono generate catene di approvvigionamento più corte e più semplici, produzione localizzata, modelli di distribuzione innovativi e nuove partnership.

Per valutare la produzione additiva come una valida alternativa ai tradizionali modelli produttivi, il progettista dovrebbe considerare l'intera filiera dei processi additivi, dal singolo processo di stampa 3D alla scelta dei materiali da utilizzare, con particolare attenzione all'applicabilità delle diverse tipologie di stampa, favorendo elevati livelli di personalizzazione, versatilità, precisione e garantendo miglioramenti nella funzionalità e nell'ottimizzazione dei costi.

Una confluenza di processi, materiali e flussi di lavoro digitali migliorati accelererà la crescita di produzione additiva, pertanto bisogna considerare questa tecnologia come un componente dell'infrastruttura di produzione avanzata in evoluzione e riconoscere i complessi requisiti dei prodotti finiti. [15]

Questa infrastruttura amplificherà l'impatto della produzione additiva sulla supply chain, ma i limiti fondamentali delle prestazioni devono vincolare le nostre aspettative sulla sua capacità di coesistere con le tradizionali tecniche di lavorazione.

È importante sottolineare che la produzione additiva per qualsiasi parte finita, spesso richiede la rimozione delle strutture di supporto, necessarie per le caratteristiche geometricamente complesse, e la lavorazione per adattarsi all'aspetto finale dell'elemento, aumentando i tempi e i costi di produzione.

La natura della produzione additiva, sebbene con limitazioni, consente la costruzione diretta di parti con geometrie interne complesse, facilitando l'ottimizzazione delle prestazioni basate sulla topologia e sul consolidamento degli assiemi in progetti di parti singole.

È richiesta una stretta integrazione tra progettazione, calcolo, produzione e qualificazione; questo ha motivato investimenti aziendali da milioni di euro nella produzione additiva e ha catalizzato lo sviluppo di nuovi strumenti di simulazione.

Tra i molti vantaggi a lungo termine, il valore commerciale delle prestazioni strutturali ottimizzate in termini di peso e il migliore utilizzo dei materiali determineranno significative riduzioni dei costi da parte della produzione additiva, oltre allo sviluppo di standard di qualificazione nel prossimo decennio.

L'emergere di apparecchiature additive ad alta velocità e la sua integrazione in sistemi automatizzati che producono parti finite consentiranno un accesso più ampio alla produzione additiva per la produzione in serie, guidando al contempo miglioramenti continui rispetto ai metodi convenzionali.

In definitiva, le industrie orientate al consumatore utilizzano questa tecnologia per realizzare la "completa libertà di produzione", che è definita come la capacità di realizzare qualsiasi combinazione di complessità, personalizzazione e volume del prodotto.



## 7.1 CARATTERISTICHE RICHIESTE PER L'ADOZIONE SU LARGA SCALA

Il concetto di produzione additiva come processo di produzione praticabile su larga scala non è ancora compreso da molte aziende e consumatori, con il pensiero ancora dominato dalle tecnologie additive per le applicazioni di prototipazione.

In questo paragrafo si analizzerà uno studio Delphi [16] da cui si identificheranno i requisiti necessari per l'uso delle tecnologie additive come mezzo praticabile per fabbricare prodotti finali usati su larga scala.

La tecnica Delphi è una forma specializzata di interazione di gruppo che genera idee, proiezioni e soluzioni: in questo caso sono stati analizzati i pareri, mediante domande specifiche, di esperti del settore additivo.

La metodologia non solo ha considerato il livello di accordo, ma ha preso in considerazione anche il livello neutro e di disaccordo per ogni requisito.

Sono stati individuati 37 requisiti, elencati nella Tabella 8, che saranno classificati in varie classi di importanza alla fine dell'analisi.

Tabella 8 - Requisiti/prerequisiti

1. Customers of RM system could operate almost anywhere, so an RM supply chain has to ensure that all the regions of the world are sufficiently covered;	8. Availability of repeatable machines	15. Ability to build parts fit for purpose	22. Materials batch recording	29. Speed of manufacture	36. Increase in market demand
2. Most equipment vendors or resellers are used to dealing with corporations. Doing business with individuals that are working from their home may create some interesting challenges	9. Availability of product disposal recycling instructions	16. Manual effort required for finishing (smoothing/polishing) must not represent a large cost and time overhead	23. Stability of material supply	30. Appropriate method of delivery	37. Ability to build in large batches to make the build process, which usually requires expensive equipment to be competitive with conventional technology
3. Some equipment vendors and resellers may not be set up to accommodate the individual needs of equipment owner operating from their home, garage or dormitory room	10. Availability of quality assurance procedure instructions	17. Qualification of parts	24. Stability of material specification	31. Automation of the process	
4. Technical support and service may require change as RM finds its way into non-conventional setting	11. Availability of part inspection protocol instructions	18. Availability of a greater range of materials	25. Improvement in scheduling procedures	32. Increase in throughput	
5. Reduction in cost of RM products and production	12. Improvement in surface finish	19. Availability of improved materials	26. Optimisation in "safe" building parameters	33. Improvement in cycle time	

6. Design optimisation	13. Improvement in accuracy	20. Availability of long term material properties data	37. Dimensional tolerance	34. Increase in public acceptance	
7. Availability of reliable machines and products	14. Improvement in post operation	21. Availability of materials safety data	28. When building parts in large batches, the variance of dimensions and material properties must not differ significantly from centre to the edge of the build	35. Increase in large company acceptance	

È stata utilizzata una tecnica basata sulla media pesata per analizzare i risultati e i requisiti per l'adozione su larga scala della tecnologia additiva.

I requisiti sono stati classificati, in base alle preferenze dei partecipanti, in tre classi di requisiti:

- Classe A: questa classe contiene undici requisiti (elencati nella Tabella 9) che sono stati identificati come i più importanti. Questi requisiti hanno un tasso di accordo del 100%; cioè una media pesata di 7. È interessante notare che cinque degli undici requisiti della Classe A riguardano questioni tecniche relative alla tecnologia e ai materiali. Inoltre, gli esperti concordano sul fatto che il costo complessivo delle macchine, dei prodotti e della lucidatura manuale del prodotto finale deve diminuire.

Tabella 9 - Requisiti di classe A

Requirements	M <sub>w</sub>
Technical support and service may require changes as RM finds its way into non-conventional setting	7
Reduction in cost of RM products and production	7
Availability of reliable machines and products	7
Availability of repeatable machines	7
Availability of quality assurance procedure instructions	7
Manual effort required for finishing (smoothing/polishing) must not represent a large cost and time overhead	7
Availability of long term material properties data	7
Availability of materials safety data	7
Stability of material supply	7
Increase in large company acceptance	7
Dimensional tolerance	7

- Classe B: la media ponderata della classe B è 6,63.  
La classe è considerata seconda in termini di importanza: i requisiti sono elencati nella tabella 10.  
L'analisi considera i requisiti di questa classe molto importanti, ma non nella misura dei requisiti della classe A.  
Tuttavia, nel caso di molti settori industriali, è possibile che questi requisiti siano soddisfatti prima che le tecnologie additive vengano utilizzate su larga scala.  
La maggior parte dei requisiti della Classe B può essere considerata correlata al materiale e alla tecnologia; per esempio, disponibilità di materiale migliorato e ottimizzazione dei parametri di costruzione.

Tabella 10 - Requisiti di classe B

<b>Requirements</b>	<b>M<sub>w</sub></b>
Design optimisation	6.63
Availability of part inspection protocol instructions	6.63
Availability of improved materials	6.63
Stability of material specification	6.63
Optimisation in “safe” building parameters	6.63
When building parts in large batches, the variance of dimensions and material properties must not differ significantly from the centre to the edge of the build chamber	6.63

- Classe C: questa classe contiene requisiti aventi una media ponderata di 6,25 (come si vede nella Tabella 11).  
I requisiti in questa classe possono essere considerati principalmente il processo di produzione e la tecnologia correlata, come il miglioramento della post-operazione e l'aumento della produttività.

Tabella 11 - Requisiti di classe C

<b>Requirements</b>	<b>M<sub>w</sub></b>
Improvement in post operation	6.25
Ability to build parts fit for purpose	6.25
Qualification of parts	6.25
Increase in throughput	6.25

In questi risultati va notato che la maggior parte dei requisiti altamente valutati sono legati alla tecnologia, ai materiali e alla catena di approvvigionamento.  
Dai risultati, inoltre, emerge chiaramente che è necessario un miglioramento in termini di tecnologia e apparecchiature additive: la disponibilità di macchine affidabili e ripetibili e

la tolleranza dimensionale sono state individuate da tutti gli esperti come requisiti fondamentali.

Un altro fattore importante da tenere in considerazione è che quando la tecnologia additiva viene applicata alla produzione su larga scala, le dimensioni dei lotti produttivi saranno tendenzialmente grandi, e in tale situazione è importante l'ottimizzazione dei parametri additivi per favorire le economie di scala.

La registrazione dei lotti di materiale è importante per la tracciabilità delle materie prime, in particolare nell'industria aerospaziale e automobilistica.

Inoltre, alcuni dei requisiti sono problemi legati alla catena di approvvigionamento a monte, come la stabilità della fornitura di materiale, e altri sono problemi della catena di approvvigionamento a valle, come il protocollo di ispezione delle parti, smaltimento e riciclaggio dei prodotti, canali di distribuzione appropriati e registrazione dei lotti di materiale.

Va ricordato che tutti i requisiti identificati in questa analisi potrebbero non avere la stessa importanza per tutti i settori industriali ad eccezione dei requisiti di classe A che hanno un accordo rispettivamente del 100% tra gli esperti.

I risultati di questa ricerca delineano lo stato attuale delle cose nel settore della produzione additiva e indicano l'ambito della ricerca e dello sviluppo accademico e industriale che richiede attenzione.

## 8. PROCESSI DI PRODUZIONE IBRIDI

La combinazione di produzione additiva e sottrattiva fornisce un approccio promettente per una progettazione efficiente della catena di processo.

I processi di produzione ibridi offrono una serie di vantaggi come una migliore qualità della finitura, tempi di produzione più brevi e una ridotta usura degli utensili.

L'integrazione della stampa 3D in un ambiente di produzione, insieme ai processi di produzione convenzionali, offre la flessibilità per accelerare l'immissione sul mercato dei prodotti consentendo in seguito la produzione di volumi più elevati.

Mentre la stampa 3D offre molteplici vantaggi di produzione, tra cui la capacità di produrre geometrie di parti complesse senza costi di attrezzaggio e una catena di approvvigionamento decentralizzata, l'uso di robusti materiali ingegnerizzati per applicazioni ad alte prestazioni sono rimasti sfuggenti.

Tali modifiche alla struttura delle catene del valore saranno lente poiché il cambiamento dipende in primo luogo dalle aziende che si impegnano nella riprogettazione dei componenti e dei prodotti.

Il cambiamento, infatti, filtrerà lentamente attraverso il sistema di produzione man mano che le aziende si impegnano prima nella riprogettazione di componenti e prodotti e poi in seguito iniziano a rinegoziare la loro posizione nella catena del valore. Inoltre, la produzione localizzata che utilizza materiali materia prime facilmente reperibili può anche consentire di reperire i materiali in ingresso in modo più locale, determinando anche catene di approvvigionamento più brevi con costi di trasporto inferiori.

Contrariamente alle tecnologie tradizionali, come la lavorazione con macchine a controllo numerico, i processi additivi sono limitati dalle dimensioni dei componenti, dalla velocità del processo, dai costi dei materiali, dalla precisione e dalla qualità della superficie.

Concentrarsi sulla produzione additiva senza considerare i processi convenzionali comporta rischi per quanto riguarda gli aspetti economici e organizzativi, ad esempio i costi di produzione e la velocità di produzione.

Pertanto, una combinazione di produzione additiva e sottrattiva come processi ibridi può garantire una produzione più efficiente ed efficace in termini di costi.

Per valutare un'adeguata catena di processo da queste combinazioni, è necessaria una panoramica sistematica delle relazioni e degli impatti all'interno dello sviluppo del prodotto.

Pertanto, questo capitolo si concentra su una determinazione metodica delle correlazioni e degli impatti della catena di processo per l'applicazione di strategie di produzione ibrida. Considerando gli approcci additivi avanzati, la produzione ibrida copre vari modi per la produzione di componenti con processi di produzione, materiali e funzioni diversi, suddivisi in base alle esigenze.

L'obiettivo potrebbe essere ad esempio la riduzione dei tempi e dei costi, ad esempio riducendo le fasi di lavorazione come il taglio e la finitura per risparmiare materiale.

Oltre a ciò, l'integrazione di più parti singole in un unico componente potrebbe essere utilizzata per accorciare le catene di processo e ridurre la variabilità e il tasso di scarto grazie alla maggiore qualità.

Pertanto, la strategia dipende dalle funzioni dei componenti richieste e specifica se il processo di produzione (compresa la post-elaborazione) deve essere eseguito simultaneamente in un sistema di produzione o in sequenza.

In un'ulteriore definizione, la produzione ibrida è descritta come "l'integrazione di processi di produzione di metalli dissimili, che sono pianificati insieme in modo che le specifiche ingegneristiche richieste possano essere soddisfatte" [17].

Quindi, la produzione ibrida si riferisce alla combinazione di due o più processi per raggiungere le specifiche definite nell'ingegneria dei requisiti.

Sebbene l'ibridazione possa essere utilizzata per diversi vantaggi indipendentemente dalla strategia, crea anche sfide in termini di formazione dei dipendenti per questi processi combinati e di gestione dei parametri e dei materiali corrispondenti.

La produzione di beni di qualsiasi tipo richiede una definizione precisa delle condizioni al contorno relative alla sequenza del processo di produzione, all'assemblaggio generale e alle versatili esigenze di controllo della qualità.

Ognuno di questi aspetti mira ad accelerare il processo di sviluppo sia del prodotto che della produzione e garantire l'affidabilità del sistema di produzione.

L'estensione delle considerazioni sulla catena di processo verso la post-elaborazione e l'ispezione di qualità può essere interpretata in vari modi.

Comunemente, la post-elaborazione nella produzione additiva è definita come la separazione di

parti dalla piattaforma e rimozione delle strutture di supporto.

Esistono vari modi per integrare la produzione additiva nel processo di creazione del prodotto.

Pertanto, la valutazione di catene di processo adeguate è importante per ottenere una migliore comprensione delle prestazioni tecnico/economiche, nonché dei limiti dei processi di produzione in una fase iniziale dello sviluppo del prodotto.

È qui che le interfacce di processo devono essere identificate e analizzate per le loro dipendenze al fine di tener conto delle loro influenze nell'ambito della progettazione della catena di processo.

In caso di produzione, i parametri hardware e di processo sono il punto di partenza per la valutazione delle capacità.

La complessità geometrica e la dimensione del componente sono definite rispettivamente dal sistema di movimentazione relativo tra la testa di lavorazione e il substrato.

Pertanto, l'uso di sistemi a tre o cinque assi può avere un effetto significativo sulla complessità, ad esempio per la deposizione su parti esistenti con forma complessa.

Inoltre, gli aspetti trasversali dei componenti, come mostrato nella Figura 12 [17], devono essere verificati per le loro implicazioni sui processi e sui parametri di produzione, ad esempio in base alla complessità geometrica fattibile, alla separazione funzionale e all'uso di componenti multimateriale.

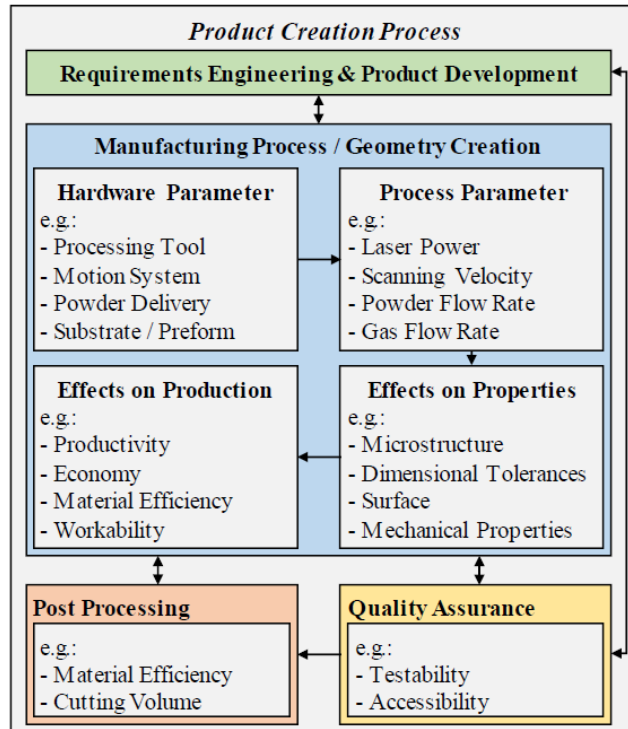


Figura 12 -Estratto da correlazioni e impatti specifici del processo per LMD

Come estensione della precedente figura, le interfacce e le interazioni della categoria "generazione della geometria" sono presentate in modo esemplificativo mediante la deposizione laser dei metalli nella Figura 13.

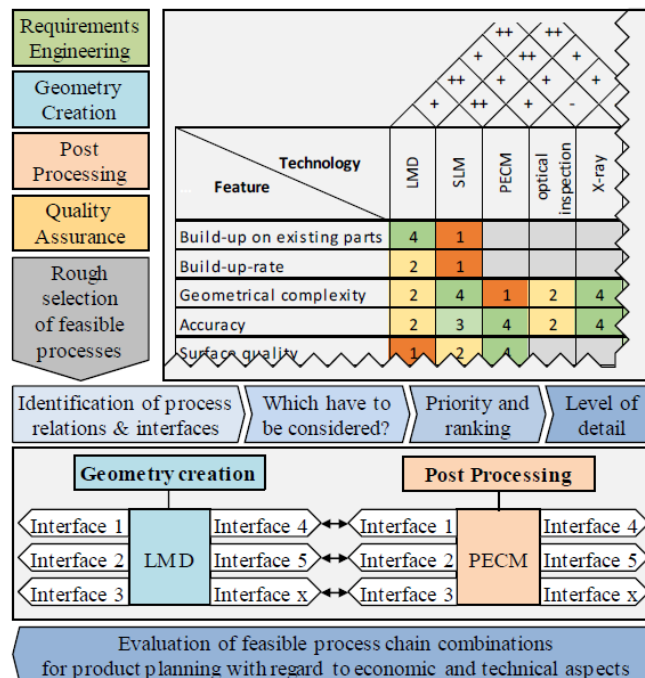


Figura 13 - Rappresentazione esemplare della selezione approssimativa del processo con successiva analisi e valutazione per la selezione della catena di processo

L'uso di componenti multimateriale influenza la microstruttura, determinando effetti diretti sulla finitura, ad esempio per quanto riguarda l'utensile richiesto e il taglio volume. Inoltre, sono inclusi gli impatti della combinazione di processi, per quanto riguarda le condizioni di compatibilità dei materiali, ad esempio, la microstruttura specifica della produzione additiva in correlazione con la post-elaborazione.

In sintesi, queste interfacce sono intese come indicatori di produttività ed economicità, rispetto ai limiti del processo produttivo.

Prima di catturare queste informazioni in una matrice di relazioni multicriteria, lo sviluppatore deve determinare quali relazioni devono essere considerate, in particolare per quanto riguarda ordine e priorità, che dipendono dall'applicazione e dal settore.

In questo contesto, è importante specificare fino a che punto le fasi del processo devono essere scomposte per poterle valutare con sufficiente accuratezza, garantendo allo stesso tempo l'usabilità dell'approccio.

Queste informazioni contribuiscono all'utilizzo di una catena di processo che corrisponde alla complessità richiesta e può quindi essere utilizzata in modo più efficiente.

Poiché le procedure si evolvono nel tempo, una valutazione accurata dei loro requisiti, capacità e interfacce è una sfida dinamica.

Sebbene i processi di produzione additiva offrano nuove possibilità nella progettazione e produzione del prodotto, i loro vantaggi e svantaggi dipendono in parte dalle fasi del processo a monte e a valle.

Come descritto in questo capitolo, questi devono essere considerati già nella fase iniziale dello sviluppo del prodotto per poter implementare processi additivi nella catena di processo e soddisfare i requisiti del prodotto.

Inoltre, è stata presentata l'ibridazione di metodi additivi e sottrattivi al fine di utilizzare i loro effetti sinergici per la produzione efficiente di prodotti, tenendo conto dei limiti del processo e delle interfacce specifiche trasversali.

Di conseguenza, è necessaria un'analisi completa della catena di processo, del materiale e delle tecnologie di produzione per la creazione del prodotto per considerare le sue interazioni e gli effetti nella pianificazione.

In questo contesto, una sfida chiave è il filtraggio delle informazioni per poter limitare i dati ricevuti a un livello orientato all'applicazione e per effettuare un confronto di rapporto costo-efficacia e funzionalità.



## 9. PROBLEMATICHE DELLA SUPPLY CHAIN E BENEFICI DERIVANTI DALL'IMPLEMENTAZIONE DELLA PRODUZIONE ADDITIVA

La produzione additiva non è una panacea per tutti i mali del settore manifatturiero; al momento è stata utile solo per i lavori di maggiore valore, con volumi ridotti e altamente personalizzati.

Per gli alti volumi di produzione, i metodi tradizionali restano i più economici.

Tuttavia, l'economia della produzione additiva sta migliorando e la soglia di costo per unità si sta spostando: è sempre più pratico utilizzare la tecnologia in applicazioni con un valore incrementale più basso e volumi più elevati.

Alimentata dall'innovazione tecnologica e dal miglioramento delle proprietà dei materiali, la produzione additiva è destinata ad espandersi ulteriormente per essere implementata non solo nella prototipazione, ma anche per l'uso finale e la produzione in serie.

Infatti, la produzione additiva non è un concetto nuovo per il settore manifatturiero, in quanto viene già impiegata nei più svariati settori industriali per un'ampia gamma di parti finali.

La vera novità è il riconoscimento della transizione che la produzione additiva ha sperimentato, passando da tecnologia di nicchia a strumento pratico di produzione,

Un tempo limitata alla prototipazione di progetti di design, la produzione additiva sta segnando il processo di produzione in un senso più ampio, per offrire una gamma di vantaggi, in termini di efficienza ed efficacia, utili per le imprese manifatturiere.

Anche se le tecnologie di produzione additiva sono in circolazione fin dagli anni '80, il settore ha ricevuto molta attenzione dopo il 2010, quando si iniziò a capire che queste tecniche avrebbero trovato un ampio utilizzo nelle applicazioni per consumatori nelle aziende.

Da qualche anno le aspettative sono più realistiche e le tecnologie di produzione additiva professionale si sono sviluppate concretamente in svariati modi.

Le recenti innovazioni in termini di meccanica, materiali e software hanno reso questa tecnologia accessibile ad una vasta gamma di attività, consentendo a sempre più aziende di utilizzare gli strumenti che in precedenza erano alla portata di pochi settori tecnologici.

Tra le tecnologie di traino, funzionali ad accelerare non solo la progettazione ma anche la realizzazione di nuovi prodotti, le aziende manifatturiere, infatti, oggi guardano alla produzione additiva con attenzione e ne riconoscono i vantaggi anche nell'ottica di rafforzare le proprie supply chain.

Questo è documentato dagli investimenti crescenti nella tecnologia additiva e nel digital manufacturing, riconosciuti come valide alternative ai sistemi di produzione tradizionale, ma anche come opportunità per accelerare il processo di innovazione, grazie alle elevate possibilità di personalizzazione dei nuovi prodotti riducendo gli sprechi.

Il report stilato nel 2016 da PWC, sulle principali tendenze della manifattura industriale, identifica la produzione additiva come una delle soluzioni probabilmente a maggiore impatto sugli ambienti industriali, considerandola come uno sviluppo che sarebbe saggio adottare da parte delle aziende produttrici.

Traendo vantaggio, appunto, dall'attuale rinascimento tecnico, le imprese possono migliorare la produttività all'interno dei propri stabilimenti, competere con i rivali e mantenere un vantaggio nei confronti dei clienti che a loro volta desiderano trarre profitto dall'innovazione.

La soluzione additiva, per le aziende, offre una soluzione che abilita e favorisce flussi di lavoro di produzione end-to-end in grado di fornire parti ad alte prestazioni.

Qualità delle parti, velocità di stampa, proprietà dei materiali e costi generali del sistema sono tutti elementi che questa tecnologia migliora, facendo diventare realtà la produzione diretta.

Questo cambiamento rende possibile integrare la produzione additiva nelle catene di fornitura come strategia per ridurre gli impatti delle interruzioni isolate o globali.

Infatti, la produzione additiva può rendere più resilienti le supply chain con una produzione più sostenibile, flessibile e personalizzata.

Gli stampi creati per produzione additiva rispondono ad un'esigenza cruciale per le produzioni di corto e medio termine, in cui i costi per l'attrezzatura non sarebbero altrimenti recuperabili.

Pertanto, recentemente, ricerche e attenzioni sono state poste sulla produzione ibrida, in modo da superare la forte limitazione della scarsa finitura superficiale delle tecniche additive.

L'integrazione funzionale e di progettazione può aumentare ulteriormente l'efficacia dei costi, poiché gli sforzi di assemblaggio di un prodotto finale possono essere ridotti.

La sostenibilità diventa, infatti, sempre più importante per le aziende e i clienti finali di tutti i settori: ciò è direttamente collegato ai vantaggi della produzione additiva e giocherà un ruolo fondamentale d'ora in avanti.

Come si evince da quanto detto sopra, il mondo delle tecnologie additive è in continua crescita grazie alle aspettative di diffusione in molti settori industriali, come quello automobilistico, aerospaziale e medicale.

C'è da dire, però, che le numerose limitazioni e il costo delle parti stampate ne hanno notevolmente pregiudicato l'utilizzo.

Andrò di seguito a valutare i principali problemi per l'adozione attuale della produzione additiva nelle supply chain, cercando di integrare delle soluzioni a questi problemi in modo tale che produzione additiva e tradizionale si possano implementare al meglio sull'intera catena di approvvigionamento con conseguenti benefici per tutto il ciclo di vita del prodotto, indipendentemente dal settore industriale.

## 9.1 DISCUSSIONE

Ci sono, per quanto riguarda la produzione additiva, diversi pregiudizi legati soprattutto al suo utilizzo passato. In questo paragrafo andrò ad analizzare i pregiudizi ed i problemi che più riguardano la produzione additiva, andando ad associare una soluzione a ognuno di essi.

Per quanto riguarda i pregiudizi, l'opinione comune si sofferma essenzialmente su tre argomenti:

- Prototipazione;
- Investimenti;
- Costi di produzione.

Uno dei principali pregiudizi nei confronti della produzione additiva è che serva solo per produrre velocemente modelli o prototipi da realizzare poi con le tecnologie tradizionali. Questo però è falso, perché limitandosi alla prototipazione non si sfruttano i vantaggi offerti in produzione, come per esempio la possibilità di produrre con facilità pezzi diversi in un singolo lotto, senza dover riconfigurare la macchina.

Per quanto riguarda gli investimenti, invece, è opinione diffusa che gli investimenti necessari per dotarsi di un sistema additivo siano molto alti.

La realtà, è che, specialmente negli ultimi anni, sul mercato è possibile trovare macchine per la produzione additiva a prezzi che sono molto più accessibili per tutte le aziende.

È anche comune credere che i costi di produzione siano elevati a causa delle materie prime della produzione attiva il cui prezzo è alto rispetto ai materiali usati per la produzione sottrattiva.

Ciò è vero, ma solo in parte; infatti, non va sottovalutata la mancanza quasi totale di scarto e la prospettiva di discesa dei prezzi sia per le crescenti economie di scala sia perché il lock-in, a livello di produttori di materie prime, sembra destinato a durare poco.

Stanno infatti arrivando sul mercato macchine capaci di utilizzare polveri di svariati produttori, con gli evidenti vantaggi che ne conseguono.

Invece, uno dei problemi reali che si oppone alla diffusione della produzione additiva è la mancanza di know-how specifico.

Infatti, molti imprenditori sono a conoscenza delle potenzialità che la produzione additiva potrebbe portare alle linee produttive, ma all'interno delle aziende spesso mancano conoscenze e competenze specifiche per implementare e valorizzare tale situazione.

Alla conoscenza tecnica, infatti, va sempre affiancata una radicata e condivisa conoscenza culturale e quindi anche un cambio di approccio e mentalità.

Questo cambio di approccio deve iniziare dall'alto della piramide aziendale, in modo tale che tutti i membri in azienda riescano a dare fiducia al cambio strategico aziendale e permettano di sopperire all'iniziale mancanza di know-how, riuscendo a superare la path dependence.

Il risultato dipenderà fortemente dalle intenzioni della società e dagli incentivi messi in atto per ottenere i risultati desiderati.

A livello di problematiche lungo la supply chain, ci sono punti di attenzione più operativi e specifici che vanno segnalati ed analizzati, a cui la produzione additiva potrebbe fornire una soluzione.

L'usura causata dalla lavorazione costante, le sollecitazioni termiche, i punti di saldatura deboli e i meccanismi multicomponente sono tutti fattori che possono alla lunga compromettere o danneggiare del tutto alcune parti di fondamentale importanza della linea di produzione, come ad esempio pinze e attrezzi, spesso causando problemi di qualità dei prodotti.

I conseguenti fermi dell'impianto nell'intervallo di tempo necessario per programmare ed eseguire una riparazione possono essere al tempo stesso molto costosi.

Stampare mediante tecnologie additive una parte secondo specifiche progettuali differenti in grado di ridurre il numero di componenti individuali necessari, rafforzare le strutture inclini alle rotture o modificare la topografia delle superfici è la soluzione in grado di ridurre in modo significativo il tasso di guasti.

Infatti, la produzione additiva offre i vantaggi maggiori quando viene applicata in un contesto di riprogettazione a valore aggiunto.

Inoltre, stampare mediante la produzione additiva parti fondamentali della linea di produzione consente di mitigare i rischi associati alla supply chain, nonché di ridurre in modo significativo i tempi di risposta per le parti in manutenzione.

Questa scelta evita inoltre la necessità di ordinare grandi quantità di parti di ricambio che potrebbe essere costoso tenere a magazzino; infatti, con la produzione additiva è invece possibile stampare e tenere in sede un volume minore o una maggiore varietà di parti.

Altro punto di attenzione è relativo ai prodotti che hanno un alto tasso di scarto mediante la fabbricazione tradizionale.

Eliminare completamente i prodotti difettosi o assicurarsi che il tasso di scarto ricada entro limiti stringenti per quanto concerne il livello di qualità accettabile, è un'ambizione universale per i produttori.

I difetti di lavorazione, ad esempio i problemi o guasti del prodotto che si verificano in presenza di condizioni di produzione standard, rappresentano una perdita in termini di qualità, reputazione e costi, oltre a costituire una minaccia per i principi di snellimento della produzione.

Sebbene l'errore umano possa essere uno dei fattori che contribuiscono ai problemi di qualità del prodotto, questi sono più comunemente associati a impostazioni errate delle apparecchiature, malfunzionamenti degli utensili e prestazioni scadenti dei componenti di assemblaggio.

Queste sono problematiche che la produzione additiva è in grado di affrontare, migliorando le capacità di controllo del prodotto nelle fasi chiave del processo di produzione e ottimizzando le prestazioni e la coerenza dei componenti attraverso la riprogettazione.

Se un componente si guasta o ha prestazioni scadenti con cadenza regolare, una riprogettazione in grado di trarre vantaggio dai benefici offerti dalla tecnologia additiva potrebbe essere la soluzione.

Ad esempio, un problema comune delle pinze a ventosa tradizionali è che i punti di assemblaggio interni tendono a presentare perdite d'aria: con l'andare del tempo questo

può determinare lo scivolamento del prodotto che, a sua volta, può causare problemi di qualità e tassi di scarto più elevati.

La stampa 3D offre la possibilità di creare canali complessi come strutture singole, eliminando la necessità di punti di assemblaggio multipli e riducendo di conseguenza il rischio di problemi legati alle prestazioni che, in definitiva, possono causare difetti.

Una delle problematiche più diffuse e concrete della produzione tradizionale è la modifica delle routine della catena di approvvigionamento causata dall'introduzione di un nuovo prodotto nella linea produzione.

Come ho già detto in precedenza, uno dei vantaggi maggiori della produzione additiva rispetto ai tradizionali processi di produzione sottrattiva è, appunto, la possibilità di sviluppare parti della linea di produzione che in precedenza erano complicate o semplicemente impossibili da produrre, in termini sia di geometria sia di composizione materiale.

Questa caratteristica può essere utile per risolvere un notevole grattacapo in termini di linee di sviluppo, in quanto permette di andare incontro a prodotti o componenti nuovi e più complessi.

Utilizzando la produzione additiva, l'utensileria personalizzata, in genere laboriosa e problematica da introdurre, può essere sviluppata, testata e implementata in un arco di tempo estremamente contenuto.

Questo enorme vantaggio può inoltre significare, in molti casi, che non è affatto necessario realizzare nuove linee o sezioni di una linea esistente.

Prendiamo ad esempio le dita prensili, un componente che spesso occorre sostituire perché si adatti alle modifiche di forma e dimensioni di un prodotto.

Stampare questo attrezzo mediante produzione additiva in un materiale alternativo e più flessibile, rispetto a quello tradizionale, e seguendo un progetto che integri una maggiore flessibilità è una scelta in grado di migliorare le capacità di accettazione del prodotto senza compromettere la precisione o le prestazioni in termini di presa.

Oltre a ridurre al minimo i costi vivi di produzione back-end, questo permette ai produttori una maggiore reattività nei confronti delle richieste, in continua evoluzione, da parte dei clienti.

Altro punto di fondamentale importanza all'interno di un'azienda è la garanzia che la nostra supply chain mitighi i rischi per la salute e per la sicurezza.

Gli addetti a processi, impianti e macchine sono particolarmente soggetti a lesioni e si ritiene che siano soggetti al rischio di patologie muscolo-scheletriche (MSD) per il 40% in più rispetto ad altre categorie di lavoratori.

Il sollevamento e la movimentazione di parti o apparecchiature pesanti, l'uso di utensili specifici e l'eccessiva quantità di tempo trascorsa in posizioni stancanti o dolorose sono tutte cause comuni e significative del verificarsi di tali patologie.

La produzione additiva potrebbe non venire subito in mente come un meccanismo ovvio per risolvere tali problemi, eppure è idealmente una soluzione adatta in molti modi.

Dal semplificare la complessità delle parti per migliorarne la manipolazione ergonomica al facilitare la creazione di strutture interne, impossibili da realizzare con qualsiasi altra tecnologia, che distribuiscano la forza riducendo al tempo stesso il peso di sollevamento complessivo, la produzione additiva sta già avendo un impatto significativo sulle strategie di salute e sicurezza in tutto il mondo.

Offre, inoltre, un metodo economicamente conveniente per la produzione di strumenti di simulazione per la valutazione dei rischi potenziali, ad esempio è possibile stampare in modo rapido e accurato le parti di una linea di produzione proposte, per poi analizzarne i rischi di manipolazione, la distanza di contatto e l'efficienza ergonomica.

Altra tematica importante per la supply chain è la riduzione della durata dei cicli di produzione.

In un'economia globale competitiva in cui i consumatori richiedono beni a basso costo, di qualità elevata e spesso altamente differenziati, migliorare lo sviluppo dei prodotti e dei cicli di produzione per ridurre il tempo di immissione sul mercato è diventata un'ambizione universale nel campo della produzione.

Massimizzare l'efficienza delle linee di produzione è essenziale.

In questo paragrafo sono già stati evidenziati alcuni vantaggi importanti e altamente rilevanti della produzione additiva per quanto concerne il soddisfacimento di questa ambizione.

Apparecchiature e componenti di assemblaggio adattabili, in grado di adattarsi a gamme di prodotti in evoluzione, nonché parti di ricambio, a breve scadenza e con tempi di consegna contenuti, prodotte mediante produzione additiva sono altamente applicabili ed in grado di ridurre sensibilmente i tempi di fermo impianto.

Si può dire, tuttavia, che la produzione additiva è maggiormente significativa per il suo potenziale di affrontare e migliorare l'applicabilità dei componenti.

Il fatto che sia possibile re-immaginare e sviluppare ex novo morsetti, attrezzi, attacchi, pinze e ugelli a partire da una vasta gamma di materiali in modo che siano più leggeri, più facili da maneggiare, più resistenti e, in definitiva, più veloci da implementare, ha implicazioni davvero di vasta portata ai fini dello snellimento dei cicli di produzione.

La catena di approvvigionamento abilitata per produzione additiva affronta anche problemi di riduzione dei trasporti attraverso la localizzazione della produzione.

Un modo per ridurre il trasporto consiste nel posizionare la produzione di parti più vicino al punto di assemblaggio.

La produzione localizzata di parti additive presuppone la semplificazione, la sostituzione della produzione convenzionale e la dequalificazione.

La riduzione dei trasporti e la conseguente produzione più vicino al mercato presuppone che non solo la produzione di parti possa essere localizzata, ma anche l'assemblaggio.

In altre parole, oltre alla produzione di parti che non richiede strumenti e competenze specializzate, anche l'assemblaggio dovrebbe essere semplice e non richiedere strumenti e competenze specialistiche.

Uno sviluppo della pratica di localizzazione che può eventualmente affrontare questo problema, e la questione dei requisiti di competenze per la pre e post-elaborazione, è la condivisione della capacità della produzione additiva negli hub di produzione localizzati.

Il potenziale vantaggio dello spostamento della produzione in un hub comune dipende dall'aumento dell'utilizzo della capacità e dalla riduzione del costo di transito dei materiali e dei prodotti.

Per quanto riguarda la manodopera, invece, al contrario di quanto si possa pensare, è la componente più costosa della maggior parte dei processi di produzione additiva.

Prima di poter avere un posto rilevante in fabbrica, i sistemi di produzione additiva devono ridurre le necessità di manodopera e adattarsi ai workflow di manifattura esistenti.

Grazie ai miglioramenti dei flussi di lavoro e della tecnologia sarà possibile risparmiare tempo e manodopera.

Esistono dei sistemi di stampa stereolitografica che semplificano la post-elaborazione tramite l'automazione delle postazioni di lavaggio e polimerizzazione post-stampa.

Infatti, le aziende del settore della produzione additiva offrono sempre più spesso dei sistemi modulari e semiautomatici, che semplificano i workflow di post-elaborazione e che includono la gestione e l'estrazione della polvere, il trattamento termico e la rimozione delle parti.

Proprio come i computer sono passati da un elaboratore centrale ai pc desktop negli anni '80, i sistemi di stampa 3D sono oggi distribuiti piuttosto che monolitici.

Per esempio, Formlabs, Stratasys, 3D Systems e Mass Portal hanno introdotto stampanti modulari, compatte e automatizzate per le plastiche.

Braccia robotiche e sistemi su binario si occupano della rimozione delle parti, semplificando così il lavoro dell'operatore e consentendo quindi alle stampanti di funzionare 24 ore al giorno in produzione continua automatizzata.

Dei software di gestione intelligente ottimizzano la coda di stampa, permettono il monitoraggio a distanza e si integrano con i sistemi CRM (Customer Relationship Management), ERP (Enterprise Resource Planning) e MES (Manufacturing Execution System).

Una serie di sensori rileva le stampe non riuscite e protegge gli operatori.

I sistemi modulari offrono inoltre il beneficio della ridondanza: se una macchina si guasta, il carico di lavoro può essere distribuito sulle altre per continuare la produzione senza interruzioni

Queste celle automatizzate influiscono ulteriormente sull'economia della produzione additiva, perché trasformano un gruppo di macchine desktop in una catena di produzione, offrendo rendimento elevato a basso costo.

Inoltre, consentono a ingegneri e progettisti di usare la stessa piattaforma di stampa 3D sia per i prototipi sia per la produzione, riducendo i costosi processi di produzione per la progettazione e accorciando i cicli di sviluppo dei prodotti.

A mano a mano che i sistemi di automazione migliorano, e acquisiscono la capacità di gestire forme irregolari e uniche, è possibile rendere automatici altri aspetti della produzione additiva.

I robot possono rimuovere supporti, applicare rivestimenti e usare adesivi per combinare più parti stampate mediante tecnologia additiva e tecnologia convenzionale, andando oltre la produzione digitale e realizzando invece un assemblaggio digitale.

Quindi, le tecnologie additive, combinate con le strutture di produzione digitale che collegano le macchine e i sistemi software di controllo della produzione in località sparse in tutto il mondo, possono essere utilizzate in altri settori per aumentare la flessibilità dei processi manifatturieri e di lavorazione: la stampa 3D industriale consente, infatti di riadattare la produzione per rispondere alla domanda di nuovi prodotti e alle esigenze dei singoli clienti.

Queste, pertanto, sono tecnologie che assumeranno un peso maggiore anche nello sforzo dei singoli Paesi che andranno verso una produzione più sostenibile in quanto permettono di aumentare la trasparenza della catena di fornitura, di transitare a una produzione locale e su richiesta e riducono gli scarti rispetto alla produzione convenzionale.

Considerando tutti insieme i percorsi aperti dalla produzione additiva nella produzione di parti si ottiene una valutazione più che positiva.

Infatti, con il continuo aumento della varietà e della complessità dei prodotti, le attività odierne e future, relative ai ricambi, subiranno un forte impatto.

L'aumento dei costi e della complessità della supply chain per la pianificazione, la produzione, lo stoccaggio e la consegna richiederà uno spostamento dalle parti fisiche verso prodotti e servizi digitali.

Nell'ambito di questo cambiamento, in relazione alla produzione additiva, vedremo emergere nuovi modelli di business, guidati da tre tendenze chiave:

1. Digitalizzazione della produzione;
2. Crescente attenzione al post-vendita, all'assistenza e alla complessità in aumento;
3. Produzione sostenibile ed efficiente on demand.

La produzione additiva risponde perfettamente a questi requisiti e svolgerà un ruolo sempre più importante nel risolvere le minacce alla catena di fornitura, come l'obsolescenza di una singola parte, le carenze sistematiche della catena di fornitura e gli elevati costi di inventario.

Le tecnologie additive, quindi, a livello industriale consentono una produzione orientata alla domanda, snellendo i processi e rendendo più solida la catena di fornitura.



## 10. AVANZAMENTI ATTUALI DELLA PRODUZIONE ADDITIVA

I processi di produzione ibridi utilizzano un processo additivo per costruire una forma quasi definitiva che verrà poi lavorata in seguito da un processo sottrattivo per raggiungere la sua forma finale ottenendo la precisione desiderata.

Spesso, per la maggior parte dei produttori tradizionali, implementare la produzione additiva rappresenta una sfida e un investimento importante.

Pertanto, la crescente domanda di prodotti con geometria complessa e personalizzabili potrebbe essere soddisfatta stabilendo capacità di produzione additiva più vicine alle catene di approvvigionamento di produzione tradizionali esistenti.

Attualmente, la sostenibilità è uno degli argomenti principali per quanto riguarda l'adozione della produzione additiva.

Amministrazioni, ricercatori e aziende stanno concentrando i loro sforzi per elaborare processi di produzione sostenibili con un basso danno per l'ambiente.

Vengono, inoltre, compiuti studi sempre più approfonditi per garantire che i nuovi processi di produzione additiva siano sostenibili o, almeno che riescano a ridurre il loro impatto ambientale.

Il principale motore per l'adozione delle tecnologie di produzione additiva è ancora economico, mentre l'influenza di altri fattori, come sociale e sostenibile, è minima.

Questo capitolo è volto a presentare un quadro aggiornato delle ultime tendenze nella produzione additiva.

Di seguito, vengono presentati alcuni dei più recenti progressi e temi di ricerca nella produzione additiva. [18]

Tra questi, è possibile evidenziare quanto segue:

- Sono in corso la ricerca e lo sviluppo di tecnologiche macchine ibride che riescano a combinare, in maniera sempre più accurata, la produzione additiva con i processi di produzione convenzionali.  
In questo modo è possibile beneficiare dei vantaggi di entrambi i processi e alleviare gli svantaggi di ciascuno.
- Nuovi materiali sono in fase di studio e sviluppo per diverse applicazioni. La bio-stampa in medicina guida la ricerca e lo sviluppo di biomateriali adatti per gli impianti.
- La qualità e il controllo dei pezzi devono essere garantiti dalla produzione additiva, necessaria per implementare sistemi di ispezione e monitoraggio.
- Diversi risultati vengono analizzati per l'ottimizzazione dei processi, come la qualità della superficie, le proprietà meccaniche, le variazioni dimensionali o le deviazioni di forma. Infatti, la produzione additiva copre un ampio campo di applicazione; quindi, si stanno sviluppando nuove tecnologie che si adattano ai risultati desiderati.

- Le riproduzioni degli elementi possono essere effettuate con la produzione additiva attraverso l'acquisizione di dati e l'utilizzo degli stessi, utilizzando tecniche avanzate come la tomografia computerizzata, in particolare in applicazioni come la biomedicina.
- Sono in corso nuovi studi, di notevole rilevanza, sulla sostenibilità nella produzione additiva, soprattutto sul riutilizzo dei materiali nei processi di produzione o sull'uso di materiali riciclabili.

Quindi, la produzione additiva ha raggiunto un livello di maturità tale da poter essere utilizzata in diversi ambiti industriali, prevedendo altri sviluppi e una maggiore diffusione per il futuro, oltre alla possibilità di integrare funzioni tecnologiche al fine di migliorare le performance produttive.

Al momento, le limitazioni di costo, qualità ed estetica (ad esempio, l'impossibilità di stampare parti con una finitura superficiale sufficientemente liscia) impediscono la rapida diffusione della produzione additiva nei beni di consumo.

## 10.1 RUOLO DELLA PRODUZIONE ADDITIVA DURANTE E POST COVID-19

Nel corso degli ultimi anni i produttori hanno migliorato la struttura della loro supply chain per gestire periodi di interruzione e di incertezza.

Tuttavia, la pandemia ha messo alla prova persino le catene di fornitura più resilienti.

Con l'aumento del numero di casi di Covid-19, per gli operatori del settore sanitario i volumi di dispositivi di protezione necessari per il trattamento dei pazienti sono aumentati.

Inoltre, la necessità di apparecchi di ventilazione è cresciuta in maniera esponenziale e le linee di produzione si sono fermate per la mancanza di disponibilità delle materie prime.

L'interruzione delle catene di fornitura a seguito della pandemia è stata evidente.

In questo contesto, la produzione additiva si è contraddistinta per la capacità di produrre rapidamente gli articoli necessari.

A prescindere dal settore, i produttori di tutto il mondo si sono impegnati per colmare la distanza tra la fornitura e la domanda di articoli assolutamente necessari.

La manifattura additiva ha dato prova della sua importanza negli sforzi compiuti per rispondere alla pandemia, grazie alla peculiarità di non avere alcuna necessità di stampi e attrezzaggi, grazie a tempi di risposta di progettazione e produzione quasi immediati e alla capacità di creare nuove geometrie complesse e personalizzate, nonché di eseguire operazioni di reverse engineering su parti esistenti.

Infatti, nel corso del 2020 la produzione additiva ha giocato un ruolo chiave nella risposta alla pandemia di Coronavirus, aiutando a sopperire alla mancanza di dispositivi di protezione personale, come mascherine e visiere.

Non sono mancate le iniziative delle aziende, anche attraverso la creazione di partnership pubblico-privato, volte a espandere ulteriormente il contributo del settore in questo ambito.

Negli Stati Uniti, ad esempio, si è dato vita a una partnership pubblico-privata, sotto il nome di America Makes, per sviluppare soluzioni innovative di additive manufacturing e 3D printing, sia in risposta all'emergenza sanitaria che per aumentare la competitività del Paese.

Per indagare ulteriormente sull'impatto di queste tecnologie nella lotta contro il Covid e per migliorare la risposta della sanità pubblica a future emergenze sanitarie, la Food and Drug Administration ha lanciato, insieme ad America Makes, uno studio, chiamando a raccolta singoli e aziende innovatrici nel campo dell'additive manufacturing per valutare le possibilità future.

Altro esempio viene dal consorzio che si è costruito in Europa e in Nord America nel marzo del 2020, in collaborazione con le autorità canadesi e spagnole, per produrre il primo tampone nasale stampato in 3D certificato da un'agenzia governativa.

I test clinici eseguiti sul tampone hanno dimostrato che ha la stessa affidabilità rispetto ai tamponi commerciali.

Grazie alla produzione additiva, questi tamponi possono essere prodotti ovunque e costituire un ulteriore strumento alla lotta contro la pandemia, sopperendo alla mancanza delle scorte dei tamponi già in circolazione.

La pandemia che stiamo vivendo ha dimostrato la necessità di resilienza della catena di fornitura, di digitalizzazione della produzione e di un processo manifatturiero flessibile, distribuito e più regionale.

Dopo la spinta innovativa data dalla pandemia alle tecnologie dell'additive manufacturing il mercato continuerà a crescere e le aziende guarderanno sempre di più a queste tecnologie per aumentare la resilienza e la sostenibilità delle catene produttive e di fornitura.

## 11. CONCLUSIONI

Nel corso della mia tesi ho analizzato la produzione additiva, prendendo come riferimento una panoramica completa di tutta l'evoluzione che ha avuto nel corso degli anni.

Sono partito con l'analizzare la produzione additiva da un punto di vista economico e sostenibile e successivamente è stato fatto un confronto approfondito sulle filiere, metodi di approvvigionamento e processi di produzione tra la tecnologia additiva e quella tradizionale.

La tesi si è conclusa con un'analisi dei benefici che l'implementazione della produzione additiva nelle supply chain per la produzione di massa consente di ottenere e con un capitolo sugli avanzamenti attuali che questa tecnologia sta compiendo.

Dall'analisi della sostenibilità e dell'economicità è emerso che la produzione additiva svolgerà un ruolo importante nella transizione verso un sistema industriale non solo sostenibile a livello ambientale ma anche a livello economico.

Infatti, si è visto che la produzione additiva offre alle organizzazioni l'opportunità di sperimentare i propri modelli di business di prodotto-servizio consentendo cambiamenti nella distribuzione della produzione, portando la catena di approvvigionamento ad un processo di riconfigurazione.

È essenziale che le opportunità offerte da questa tipologia di produzione supportino l'intero ciclo di vita del prodotto; infatti, la contabilizzazione della produzione additiva nel processo di progettazione può portare a una nuova generazione di prodotti che operano con successo in un'economia circolare.

È stata fatta un'analisi quantitativa per la valutazione delle prestazioni della supply chain, combinando diverse strutture della catena di approvvigionamento con tecnologie di produzione additiva e tradizionale.

In particolare, si è visto che la produzione additiva consente di progettare una supply chain più breve ed efficiente, offrendo un ottimo supporto per le prestazioni della catena di fornitura e fornendo un forte risparmio nei tempi di consegna.

Inoltre, la rete decentralizzata della produzione additiva offre la migliore soluzione in termini di holding stock e, in generale, di costi di filiera.

La combinazione di tecnologia additiva e decentramento si conferma la soluzione più flessibile, con un'elevata performance sulla soddisfazione del cliente.

Tuttavia, la strategia di produzione e la produttività della macchina influenzano la competitività della tecnologia di produzione additiva.

Infatti, il modello della produzione distribuita grazie alla produzione additiva ha le potenzialità di introdurre cambiamenti strutturali nelle catene di produzione e fornitura, di cui possono beneficiare quasi tutti i settori industriali.

La produzione additiva industriale e la produzione decentrata possono trasformare il modo in cui progettiamo, creiamo, distribuiamo e ripariamo i prodotti su larga scala.

Si tratta di una soluzione sia a breve che a lungo termine che non solo fornisce un accesso immediato alle forniture critiche, on demand, ma offre anche un'enorme flessibilità e una consegna più rapida delle merci, perché rese più vicine all'utente finale.

Quasi tutti i settori industriali possono beneficiare dell'innovazione che ne deriva, contribuendo a creare una catena di fornitura più efficiente e sostenibile.

Pertanto, una confluenza di processi, materiali e flussi di lavoro digitali migliorati accelererà la crescita della produzione, forse oltre le attuali stime ottimistiche.

La produttività ed il costo sia delle macchine che dei materiali additivi continueranno a limitare la competitività della produzione additiva se giudicati semplicemente in base ai costi di produzione; pertanto, è necessario sfruttare metriche di valore alternative e prestazioni ottimali.

Inoltre, la produzione additiva nel corso degli anni è stata soggetta a molti pregiudizi, che ormai con il tempo sono ampiamente superati e ciò permette a questa tecnologia di andare a ricoprire un ruolo molto interessante per la produzione di massa.

La produzione additiva porta numerosi vantaggi se utilizzata in maniera corretta ed intelligente, infatti, oltre a ridurre al minimo i costi di produzione back-end, permette anche ai produttori, grazie alla sua natura flessibile, una maggiore reattività nei confronti delle richieste dei clienti che sono in continua evoluzione.

Le tecnologie additive, a livello industriale, consentono una produzione orientata alla domanda, andando a snellire, in questo modo, i processi e rendendo più solida la catena di fornitura.

Attualmente, a riguardo, vengono compiuti studi sempre più approfonditi per garantire che i nuovi processi di produzione additiva si integrino al meglio con le supply chain, cercando di apportare delle soluzioni sostenibili all'intero catena di approvvigionamento.

In questo momento la produzione additiva ha raggiunto un livello di maturità che permette a questa tecnologia di poter essere utilizzata in molti ambiti industriali.

Questa tecnologia è ancora nuova e con un potenziale ancora inesplorato a pieno per quanto riguarda l'industria su larga scala e con la ricerca e lo studio potrà in futuro diventare una delle tecnologie di riferimento su cui andare a costruire una supply chain che rispetti al 100% i temi di economia circolare e produzione di massa.

## 12. BIBLIOGRAFIA

1. Materiale Didattico del professore Luca Iuliano
2. Simon Ford, Melanie Despeisse  
Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges
3. Mojtaba Khorram Niaki, S. Ali Torabi, Fabio Nonino  
Why manufacturers adopt additive manufacturing technologies: The role of sustainability
4. Marita Sauerwein, Eugeni Doubrovski, Ruud Balkenende, Conny Bakker  
Exploring the potential of additive manufacturing for product design in a circular economy
5. Runze Huang, Matthew E. Riddle, Diane Graziano, Sujit Das, Sachin Nimbalkar, Joe Cresko, Eric Masanet  
Environmental and Economic Implications of Distributed Additive Manufacturing
6. Martin Baumers and Matthias Holweg  
On the economics of additive manufacturing: Experimental findings
7. Gonçalo Cardeal, Diogo Sequeira, Joana Mendonça, Marco Leite, Inês Ribeiro  
Additive manufacturing in the process industry: a process-base cost model to study life cycle cost and the viability of additive manufacturing spare parts
8. Justin Bours, Brian Adzima, Susan Gladwin, Julia Cabral, Serena Mau  
Addressing Hazardous Implications of Additive Manufacturing
9. Ajeseun Jimoa, Christos Braziotisa, Helen Rogersb and Kulwant Pawara  
Traditional vs Additive Manufacturing Supply Chain Configurations: A Comparative Case Study

10. Tanisha Pereira, John V Kennedyb, Johan Potgieter  
A comparison of traditional manufacturing vs additive manufacturing, the best method for the job
  
11. Marta Rinaldi, Mario Caterino, Marcello Fera, Pasquale Manco, Roberto Macchiaroli  
Technology selection in green supply chains - the effects of additive and traditional manufacturing
  
12. Chris Tuck and Richard Hague  
Management and Implementation of Rapid Manufacturing
  
13. Jacopo Lettorìa, Roberto Raffaelia, Margherita Peruzzinia, Juliana Schmidta, Marcello Pellicciaria  
Additive manufacturing adoption in product design: an overview from literature and industry
  
14. Maximilian Kunovjanek & Gerald Reiner  
How will the diffusion of additive manufacturing impact the raw material supply chain process?
  
15. Haden Edward Quinlan, Talha Hasan, John Jaddou, and A. John Hart  
Industrial and Consumer Uses of Additive Manufacturing
  
16. Saad Hasan, Allan Rennie, Mohammad Rashedul, Hoque & Nisar Ahmed  
Requirements for large-scale adoption of rapid manufacturing technologies
  
17. Geoff Giordano  
A Hybrid Supply Chain
  
18. Mercedes Perez, Diego Carou, Eva Maria Rubio, Roberto Teti  
Current advances in additive manufacturing



## 13. SITOGRAFIA

- <https://stamparein3d.it>
- <https://www.meccanicaneews.com>
- <https://solveweb.it>
- <https://www.01factory.it>
- <https://www.industriaitaliana.it>
- <https://inno3.it>
- <https://www.compositimagazine.it>
- <https://magazine.ecor-international.com>
- <https://blog.moxoff.com>
- <https://formlabs.com>
- <https://www.materialise.com>
- <https://www.ip4fvg.it>
- <https://www.fficioconsulting.com>
- <https://www.innovationpost.it>