POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale

in Ingegneria della Produzione Industriale e dell'Innovazione Tecnologica

Tesi di Laurea Magistrale

Le filosofie Lean e Agile applicate all'Additive Manufacturing

Relatore

prof.ssa Atzeni Eleonora

Candidato

Valenti Lorenzo

Matricola n° 257210

Dicembre 2020

Sommario

Abstract 1

Introduzione 2

1. Additive Manufacturing: concetti fondamentali 4

Crescita dell'AM 4

Fasi di produzione 5

1. Design e CAD 6
2. Conversione in formato STL 7
3. Trasferimento alla macchina e lavorazione del file 7
4. Setup della macchina 8
5. Costruzione 8
6. Rimozione e pulitura 8
7. Post-processing 8
8. Applicazione 8

Tecniche principali 9

Stereolitografia (SL) 9

Powder Bed Fusion (PBF) 11

Altre tecniche a base di polvere 12

Fused Deposition Modeling (FDM) 13

Sheet Lamination 14

Vantaggi rispetto al Subtractive Manufacturing (SM) 15

Stato attuale 18

Settori in cui l'AM è più presente 18

Principali barriere tecniche da superare 20

2. Le filosofie Lean e Agile 21

Il Lean Thinking 21

Le tecniche più utilizzate 23

Agile management: flessibilità e reattività 25

Flessibilità 25

Strategie ibride 26

Decoupling point (DP) 26

Postponement – il caso Benetton 26

Considerazioni finali 27

3. Il ruolo della fabbricazione additiva nella riduzione degli sprechi 28

Trasporto 29

Inventario 30

Movimenti 30
Tempi d'attesa 31
Sovrapproduzione 32
Lavorazioni non necessarie 33
Difetti 33
Sostenibilità 35
Fabbisogno energetico 37
Emissioni di CO_2 40
Materiale 41
Conclusione 42
4. Legami tra AM e filosofia Agile 43
La "Mass Customization decade" 43
Flessibilità 44
DfAM 45
Delocalizzazione 46
Pezzi di ricambio 47
Integrazione tra AM e tecniche tradizionali 50
Conclusione 52
5. Presente e futuro dell'AM nella produzione e per le supply chains 53
Integrazione dell'AM nei processi odierni 53
Soluzioni ibride 57
L'AM e le supply chain del futuro 59
Quattro principi generali per descrivere l'AM nell'ambito delle strategie per la supply chain 60
Verso il futuro: ulteriori proposte e innovazioni 62
Stampa 4D 62
Altre proposte 64
6. Riflessioni conclusive 66
Ringraziamenti 69
Bibliografia 70
Sitografia 80

Abstract

La fabbricazione additiva, negli ultimi anni, ha subito un'evoluzione esponenziale. Sebbene alcuni studiosi abbiano accolto quest'espansione con grande entusiasmo, altri restano scettici riguardo al ruolo che essa potrà avere nell'industria del futuro. In questa tesi, si andranno a presentare le caratteristiche principali delle tecnologie additive, e si cercherà di capire in che modo esse possano contribuire al miglioramento delle catene produttive secondo i principi delle filosofie Lean e Agile, concludendo che hanno il potenziale per marcare un punto di svolta nella storia della manifattura, ma solo se si supereranno le barriere tecnologiche e sociali che ne impediscono un grado di espansione più elevato.

Introduzione

Il concetto di fabbricazione additiva risale agli anni ’80, ma è negli ultimi anni che questo tipo di tecnologia ha iniziato a raggiungere livelli di sviluppo tali da permetterle di essere considerata, a tutti gli effetti, alternativa o complementare alle tecniche di produzione tradizionali.

Il fatto di costruire i pezzi strato dopo strato invece di rimuovere il materiale partendo da un grezzo iniziale potrebbe rivoluzionare il modo di operare di alcune aziende, apportando cambiamenti radicali alla struttura interna ma soprattutto alla Supply Chain. I processi produttivi per la fabbricazione additiva (Additive Manufacturing - AM), infatti, sono radicalmente differenti rispetto a quelli per la fabbricazione tradizionale CNC, essendo i due metodi concettualmente opposti. Le aziende che implementeranno l’AM, quindi, non dovranno rimanere imbrigliate nel pensiero tradizionale, ma sarà necessario ripensare i loro processi partendo dalle fondamenta, per sfruttare al meglio tutti i benefici della tecnologia, cercando di massimizzarne gli effetti positivi e di minimizzare gli sprechi.

L’obiettivo di questa tesi è di introdurre i concetti fondamentali legati alla fabbricazione additiva e di capire se e in quale misura essa sia in concordanza con i principi delle filosofie Lean e Agile. Si vedrà come alcune caratteristiche intrinseche dell’AM portino ad un’eliminazione pressoché totale di alcuni sprechi e, contemporaneamente, favoriscano lead time più brevi e capacità infinite di customizzazione. Tuttavia, l’AM non può essere la panacea di tutti i mali (Cotteleer, 2014): la fabbricazione tradizionale infatti porta con sé dei benefici non trascurabili, soprattutto per quanto riguarda la produzione di massa e di prodotti non particolarmente complessi, per la qualità dei componenti in termini di tolleranze e finitura superficiale (Fera et al., 2018). Essa non sarà pertanto abbandonata facilmente, ma piuttosto si favorirà un’integrazione dei due metodi per sfruttare gli aspetti migliori di entrambi e trarre benefici più consistenti.

La tesi è strutturata in cinque capitoli, dove si analizzano nel dettaglio i pilastri delle filosofie di Lean e Agile manufacturing applicati alla fabbricazione additiva. In seguito, verrà proposto un ragionamento omnicomprensivo su come l’AM influenzerà le catene del valore nel prossimo futuro.

Il primo capitolo sarà un'introduzione all'AM, ai principi fondamentali e alle principali tecniche e materiali usati e ai vantaggi che offre rispetto alla fabbricazione tradizionale. Successivamente, si cercherà di dipingere al meglio il quadro della situazione attuale del mercato, considerando che non tutte le fonti sono contemporanee al periodo in cui si scrive e, soprattutto, sono pressoché tutte antecedenti allo scoppio della pandemia mondiale di COVID-19, che ha sicuramente contribuito a rendere ancora più incerte le previsioni sul futuro di un mercato di cui era già complicato prevedere con esattezza il grado di sviluppo, dato che si trova ancora nella fase infantile e che quindi lascia aperti diversi scenari che cambieranno a seconda del grado di adozione della tecnologia (Geroski, 2000).

Il secondo capitolo verterà sui fondamenti teorici del Lean Thinking e delle strategie Agile, con focus sui concetti di spreco, sostenibilità e adattabilità ai cambiamenti della domanda. In questo modo si potranno affrontare al meglio i capitoli tre e quattro, in cui si andranno a sviscerare i vantaggi e gli svantaggi apportati dall'AM in termini di Lean e Agile manufacturing. In particolare, l'attenzione sarà focalizzata su come l'AM ha il potenziale di diminuire o annullare molto di più gli sprechi e rappresenti una soluzione più sostenibile, per certe applicazioni, rispetto ai metodi tradizionali.

L'ultimo capitolo sarà dedicato ad una riflessione su come cambieranno le Supply Chain negli anni a venire a seconda degli scenari e delle prospettive offerte dalla tecnologia, e su quali siano attualmente i problemi da risolvere per far sì che la curva di adozione si comporti come quella tracciata nel best case scenario delle previsioni.

1. Additive Manufacturing: concetti fondamentali

Secondo lo standard SS-EN ISO 52900:2016 l'AM è definito nel modo seguente: "Processo di unione di materiali per produrre pezzi partendo da un modello 3D, generalmente strato per strato, in opposizione alla fabbricazione sottrattiva e ai processi di formatura".

Il concetto alla base è quindi che il pezzo viene costruito aggiungendo un nuovo strato di materiale allo stato preesistente. Ogni strato è una sezione, più o meno spessa a seconda della risoluzione della macchina e dei parametri impostati, di un modello del pezzo creato precedentemente grazie all'uso di un software CAD (Computer Aided Design) (Gibson et al., 2016).

Crescita dell'AM

I primi sistemi che sfruttavano la tecnologia additiva furono messi sul mercato già nella seconda metà degli anni '80. Nel 1983 Charles Hull stampa il primo pezzo della storia, inventando la stereolitografia e fondando l'azienda 3D Systems.

Negli anni successivi vengono depositati i primi brevetti per la laminazione e il Selective Laser Sintering (SLS), e nel 1989 quello per il Fused Deposition Modelling (FDM). Le quattro tecniche citate rimangono tutt'ora le più diffuse (Gibson et al., 2016).

Successivamente, l'industria ha seguito una tendenza di espansione costante, al netto di un leggero calo nei ricavi globali all'inizio degli anni 2000, con un tasso di crescita medio del 28.7% dal 1989 al 2016. Da una decina di anni la crescita è diventata esponenziale, con il mercato che ha visto il suo valore crescere di 5,7 volte dal 2010 al 2017 (Wohlers, 2017).

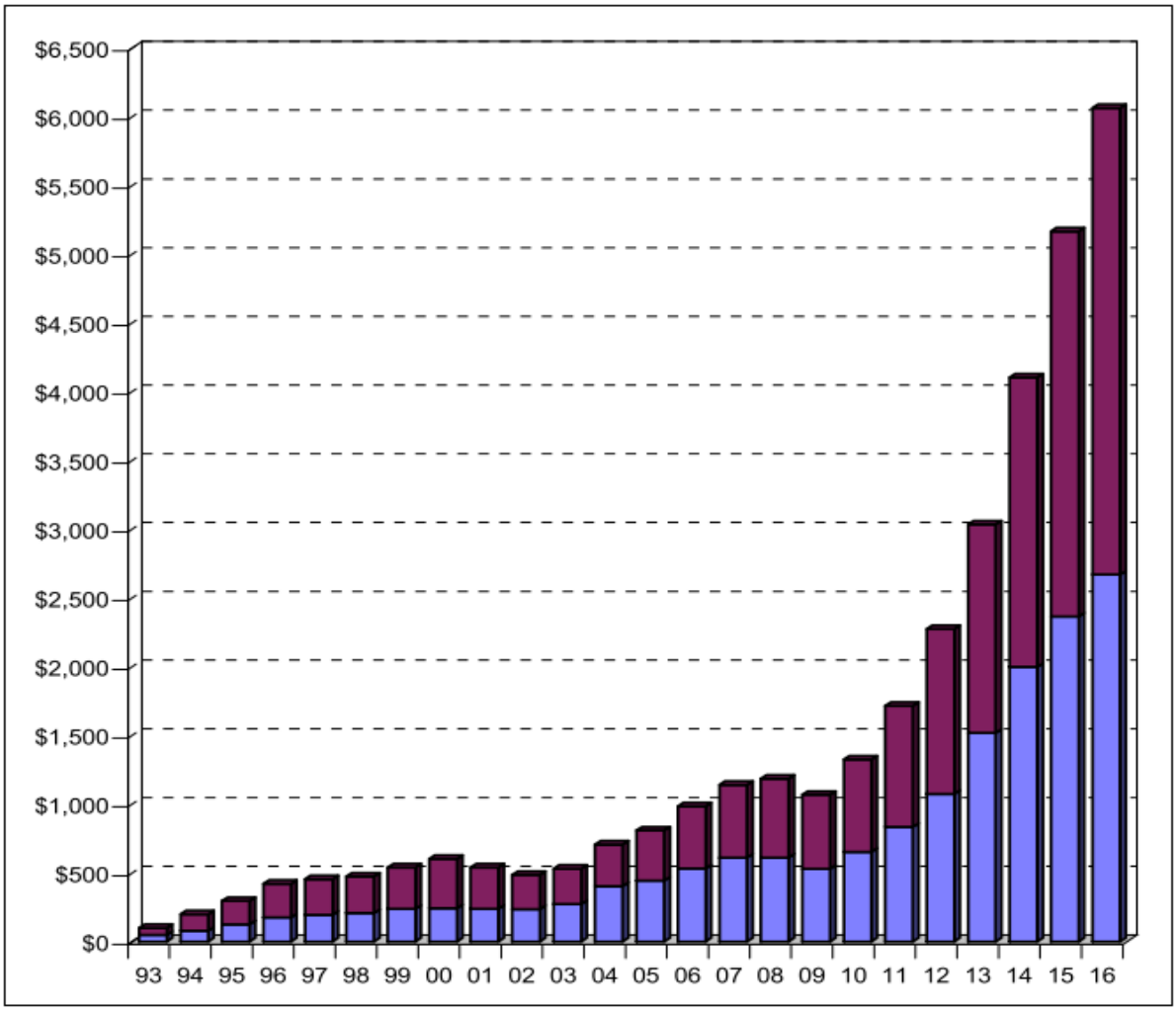


Figura 1: Ricavi in milioni di dollari per prodotti (in blu) e servizi (in rosso) di fabbricazione additiva. Fonte: Wohlers Report 2017.

Nel 2019 il mercato ha raggiunto il valore di 10,5 miliardi di dollari, e si stima possa raggiungere i 30 entro il 2025. Non è certo quale sarà l'impatto della pandemia sull'andamento futuro dei ricavi, ma l'AM ha giocato un ruolo centrale nella produzione di vari oggetti usati per contrastare il diffondersi dei contagi, come valvole per l'ossigeno e ventilatori, e il suo utilizzo in questo settore potrebbe aumentare ulteriormente (Arora et al., 2020).

Fasi di produzione

Come accennato in precedenza, il panorama delle tecniche di fabbricazione additiva è molto variegato. A seconda del metodo e dei materiali utilizzati, infatti, si possono ottenere pezzi

con proprietà non paragonabili tra loro, variando moltissimo anche le rugosità, i tempi di costruzione e il tipo di post-processamento.

Tuttavia, Gibson, Rosen e Stucker dividono il processo in otto step applicabili ad ogni tipo di tecnologia AM, con minime variazioni a seconda della particolarità del pezzo da produrre o della tecnica utilizzata.

1. **Design e CAD**

Ogni build deve partire da un file CAD in cui il pezzo è modellato. Ciò è molto utile per abbattere i lead times, perché il pezzo viene prodotto direttamente dal file CAD, ma al contempo possiede qualche limitazione legata al fatto che il pezzo potrà possedere solo i features implementate nel software. Se non si può rappresentare nel file, non si può produrre. Per questo motivo i software vengono costantemente migliorati e aggiornati.

Inoltre, il disegno del pezzo richiede tempo e non sempre i file di pezzi che sono già stati disegnati possono essere riutilizzati, specialmente nell'ambito Mass Customization, dove se anche una piccola parte è diversa per ogni cliente, bisogna disegnarlo da zero. Alcuni studi hanno lavorato all'ipotesi di ridurre i tempi per il disegno e la mole di dati conservando le parti comuni di ogni pezzo e andando a modificare solo le parti che verranno customizzate secondo le necessità del cliente (Kwok et al., 2017).

Questa fase è cruciale anche perché grazie all'AM cambia radicalmente il modo di pensare al pezzo. Non vengono più prese in considerazione le limitazioni dovute alle lavorazioni in macchine CNC, ma si cerca invece di creare un pezzo che possa essere il più performante possibile. Si andrà più nel dettaglio riguardo i vantaggi dell'AM alla fine del capitolo.

2. Conversione in formato STL

L'STL è il formato di riferimento per quanto riguarda l'AM. Il pezzo viene rappresentato attraverso dei triangoli più o meno grandi che vanno a comporre il modello 3D, come si vede in figura. Le dimensioni dei triangoli determinano la precisione e la definizione della rappresentazione.

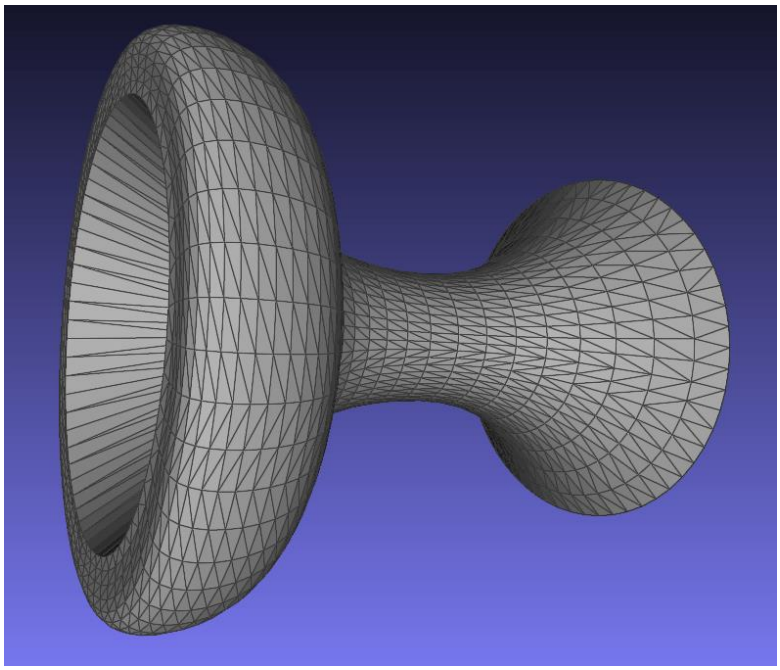


Figura 2: Pezzo in formato STL. Fonte: 3dquickprinting.com

3. Trasferimento alla macchina e lavorazione del file

In questa fase si verifica che non ci siano errori nel file, e si valuta quale sia l'orientamento migliore del pezzo per la produzione, al fine di minimizzare il materiale di supporto, i tempi di produzione e la probabilità di generare dei difettosi. Se si producono più pezzi sulla stessa macchina, si valuta la zona migliore in cui posizionarlo. Inoltre, il software effettua la preparazione del file macchina, ovvero l'individuazione del percorso ottimale di deposizione, e lo slicing, la divisione del file CAD in strati secondo le specifiche di produzione.

4. **Setup della macchina**

Le macchine richiedono una preparazione, che coinvolge il caricamento del materiale di partenza, eventuale preriscaldamento o inertizzazione della camera. I tempi possono variare da pochi minuti a un'ora circa, a seconda del sistema.

5. **Costruzione**

Il pezzo viene prodotto direttamente a partire dal CAD. Questa fase ha durate variabili a seconda del tipo di processo, dei materiali e della finitura che si vuole ottenere. Può andare da qualche minuto a molte ore.

6. **Rimozione e pulitura**

Il pezzo viene rimosso dalla macchina e pulito. Questa fase è quella che più richiede interventi di tipo manuale e una massiccia presenza dell'uomo lungo la linea produttiva. Tuttavia, le aziende si stanno concentrando sempre di più sull'ottimizzazione di questa fase ed esistono già sul mercato macchine automatizzate che richiedono sempre meno interventi umani (AMFG, 2019).

7. **Post-processing**

Molti pezzi richiedono un'ulteriore lavorazione dopo la costruzione, per migliorare le proprietà meccaniche o superficiali ed essere più performanti. Questa fase potrebbe consistere, per fare alcuni esempi, in una finitura, anche in macchina CNC, una pulitura profonda manuale, oppure un passaggio in forno per la cura e l'eliminazione di eventuali bolle non volute. Il tipo di post-processamento è strettamente dipendente dal metodo di costruzione e dai materiali scelti.

8. **Applicazione**

Il pezzo viene messo in commercio. I sistemi di produzione sono sempre più performanti, perciò i prodotti non sono più dei meri prototipi ma non hanno più nulla da invidiare ai pezzi prodotti tramite tecniche tradizionali. Anche questo aspetto verrà trattato nei capitoli successivi.

Tecniche principali

In questo paragrafo si elencheranno le tecnologie più popolari sul mercato attualmente, il loro funzionamento e i settori in cui vengono utilizzate.

Stereolitografia (SL)

La stereolitografia è un processo di fabbricazione additiva che costruisce il pezzo strato dopo strato partendo da una resina fotopolimerica liquida, che viene irradiata da un laser (solitamente UV) e solidificata tramite fotopolimerizzazione. La resina, contenuta in una vasca, è ricca di fotoiniziatori, reagenti che, scaldati, attivano la formazione di legami tra le sue molecole e costruendo quindi il pezzo. Nel sistema classico detto top down, la base posta all'interno della vasca e rivolta verso l'alto si posiziona ad uno strato, di spessore pari a quello della sezione da realizzare (layer), dalla superficie, e la resina viene scansita dall'alto. Una volta formatosi lo strato, la base si abbassa di uno strato e un sistema di riporto sistema la resina nuovamente sopra lo strato precedente in modo tale che lo strato successivo risulti omogeneo.

Solitamente, però, viene preferito l'approccio Bottom-Up: la base viene posta rivolta verso il basso, ad una distanza dal fondo della vasca pari allo spessore del layer. Il fondo della vasca è trasparente e la fonte di luce è posta sotto la vasca. La piattaforma si alza di tanto quanto è lo spessore di uno strato ogni volta che lo strato precedente è stato solidificato. Questo sistema è più veloce e preciso, non avendo necessità di un sistema di riporto del materiale e garantendo l'omogeneità degli strati. Inoltre, richiede molta meno resina nella vasca, in quanto non è obbligatorio che l'altezza della superficie della resina superi l'altezza del pezzo.

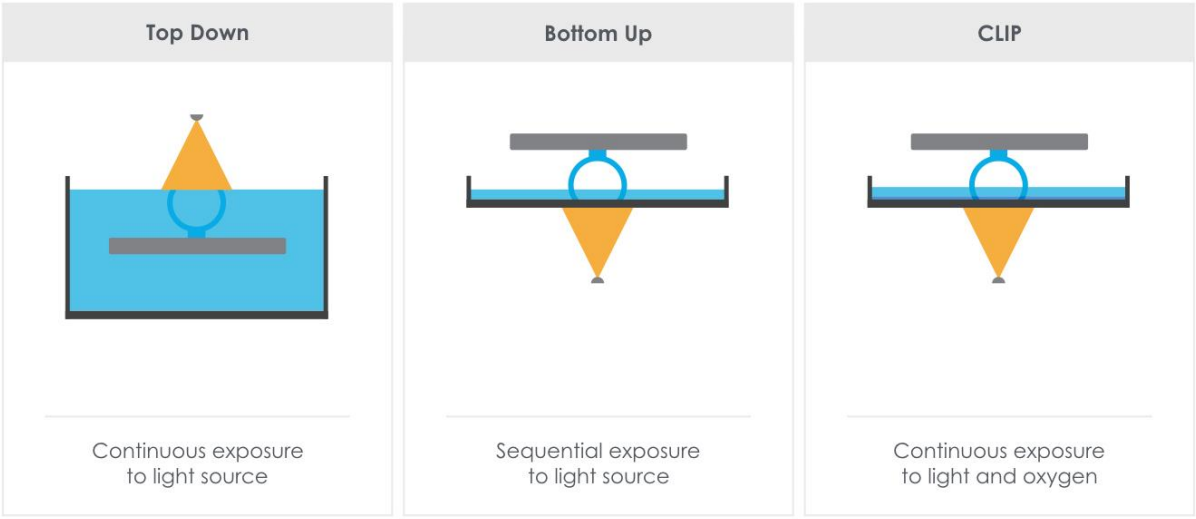


Figura 3: Stilizzazione dei processi di stereolitografia. Fonte: theorthocosmos.com

Il metodo CLIP (Continuous Liquid Interface Production) sfrutta una barriera permeabile all'ossigeno per creare una "zona morta", rendendo possibile un'esposizione continua alla luce. Inoltre, sfrutta la tecnologia di Mask Projection, in cui un fascio di luce passa attraverso una maschera che lo modella nella forma dello strato del pezzo che si vuole stampare. Grazie all'esposizione continua, si può dire che il pezzo venga "proiettato" senza interruzioni. Questa tecnologia è stata brevettata dall'azienda Carbon e permette di ottenere tempi di costruzione drasticamente più bassi, al costo però di un tempo molto maggiore di elaborazione dei dati dal CAD. Essendo la proiezione continua, infatti, lo spessore degli strati diventa infinitesimale e quindi gli strati sono molti di più, perciò la macchina ha molti più dati da elaborare (Kwok et al., 2017). Nel 2017, Carbon ha siglato una partnership con Adidas per la produzione di massa con tecnologia CLIP delle suole per le scarpe della linea FUTURECRAFT 4D.

Solitamente, tramite stereolitografia si possono ottenere pezzi polimerici con un'ottima finitura superficiale e buone proprietà meccaniche, che non richiedono post-processamenti massicci. Tuttavia, con un errato orientamento del pezzo o con parametri non settati a dovere, come velocità del laser troppo alta, c'è il rischio di incorrere in diversi fenomeni per cui la resina non si polimerizzi a dovere, facendo sì che il pezzo si pieghi o si formino onde, oppure che gli strati non aderiscano gli uni sugli altri.

Powder Bed Fusion (PBF)

In questo processo, il materiale di partenza è una polvere, che viene stesa sul piano di lavorazione e scaldata da una fonte di calore per fondere le particelle e costruire il pezzo. Una

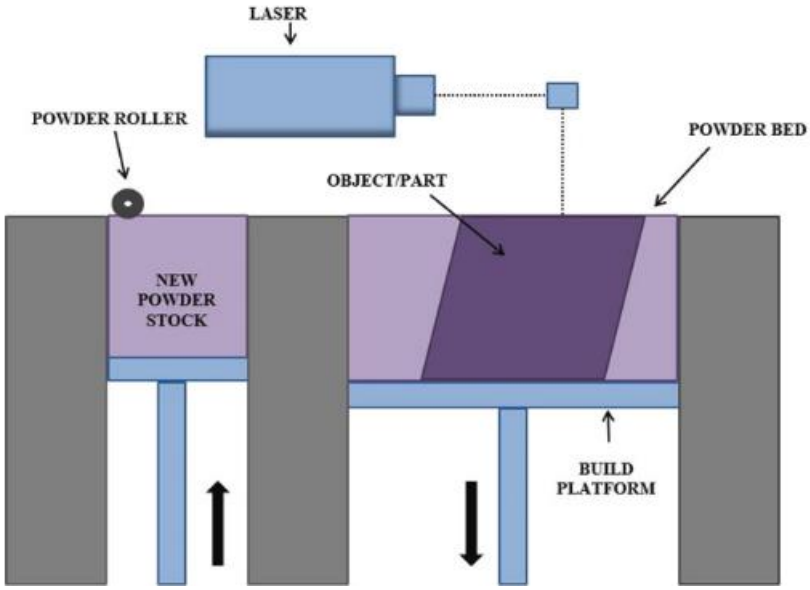


Figura 4: Modello del funzionamento di un sistema PBF. Fonte: Al Rashid et al., 2020.

volta terminato il primo strato, un meccanismo apposito riposiziona un altro strato di polvere sopra di esso per la fusione (Al Rashid et al., 2020). Esso può essere composto da una lama (Doctor blade) o da un rullo (Roller).

A seconda della fonte di calore utilizzata e della sua potenza, questi processi possono essere divisi in:

- Selective Laser Sintering (SLS): dove viene usato un laser ma non si arriva a fusione;
- Selective Laser Melting (SLM): la polvere viene fusa dal laser;
- Electron Beam Melting (EBM): si usa un fascio di elettroni per fondere le particelle.

Il primo viene usato per i polimeri, mentre gli altri due per i metalli.

Ognuno di questi ha peculiarità differenti che risultano in proprietà diverse del prodotto finito. Per esempio, i pattern di scansione non possono essere uguali tra EBM e SLS, a causa delle

diverse temperature raggiunte dalla polvere durante la fusione (più alte in EBM). La microstruttura finale, pertanto, sarà diversa.

In seguito, a seconda delle necessità qualitative di finitura superficiale, i pezzi potrebbero richiedere una lavorazione a macchina CNC, avendo essi generalmente rugosità eccessive.

I materiali utilizzati possono essere polimerici, ceramici o metallici, anche se, attualmente, questa tecnica viene usata prevalentemente per i metalli. In particolare, si usano alluminio, titanio, leghe di nickel, leghe cromo cobalto e acciaio (Roland Berger, 2017).

Questa tecnologia si è sviluppata molto nel corso degli anni, al punto che per alcuni materiali

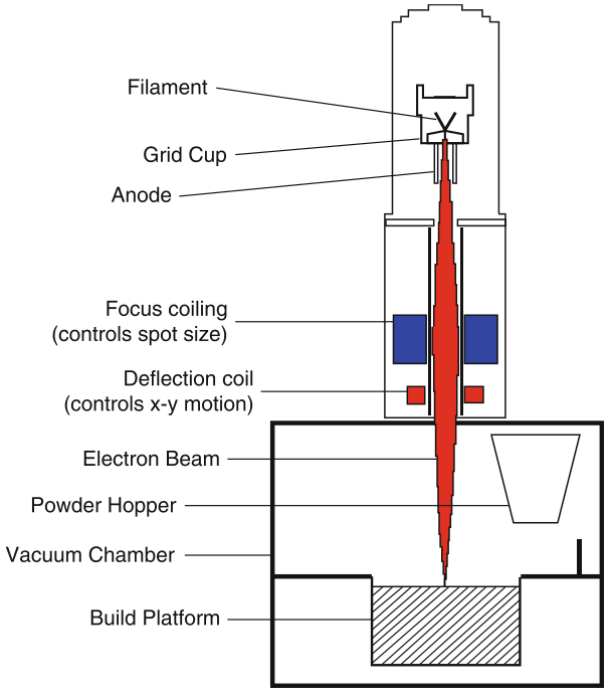


Figura 5: Modello di funzionamento di un sistema DED. Fonte: Gibson et al., 2016.

concorre direttamente con le tecniche di produzione tradizionali in termini di qualità del prodotto finito.

Altre tecniche a base di polvere

il Binder Jetting (BJ) e il Directed Energy Deposition (DED) presentano alcune analogie con i processi PBF.

Nel primo si utilizza il letto di polvere ma, al posto del laser, viene gettato in modo selettivo sulla polvere un materiale dalle proprietà aggregative (Binder) che fa sì che le particelle si uniscano. Un trattamento successivo di infiltrazione permette di ridurre la porosità e di conferire proprietà meccaniche al componente.

Il secondo, invece, prevede l'utilizzo di un laser o di un fascio elettronico in un ambiente inertizzato. In questo caso il materiale di partenza non è distribuito sul piano di lavorazione, ma viene iniettato direttamente sulla zona di deposizione da appositi ugelli posti vicino alla fonte di calore (Al Rashid et al., 2020).

Fused Deposition Modeling (FDM)

Inventato nella seconda metà degli anni '80, il Fused Deposition Modeling, grazie ad un sistema di estrusione, consiste nel forzare un materiale in stato semi solido o liquido attraverso un ugello e depositarlo nella zona di stampa. In seguito, esso si solidifica formando l'oggetto strato dopo strato.

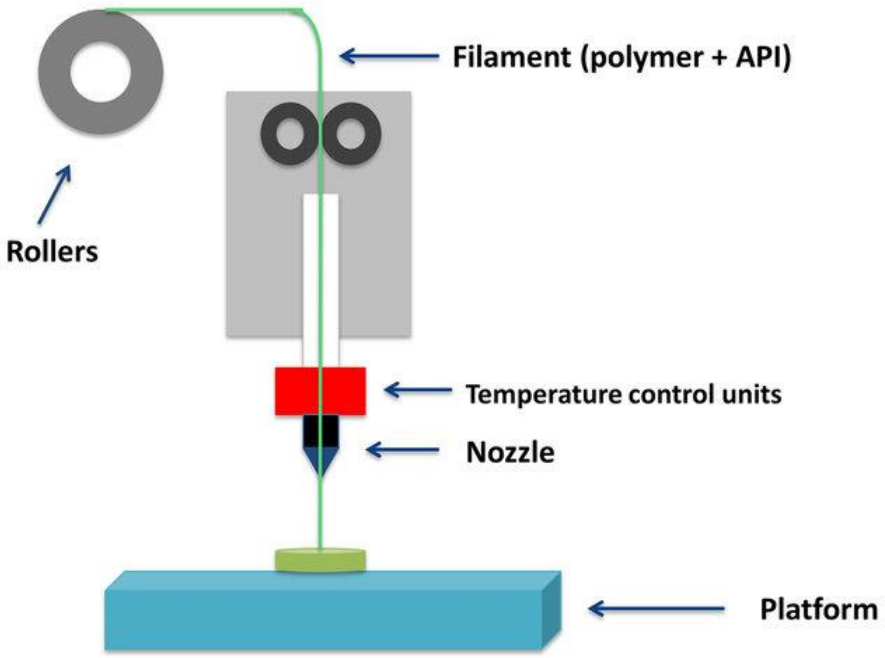


Figura 6: Processo di FDM. Fonte: Konta et al., 2017.

Alternativamente, può essere inserito all'interno della miscela un reagente che permette la solidificazione a contatto con l'aria (Gibson et al., 2016).

Le dimensioni dell'ugello determinano la risoluzione della macchina. Non si potranno, infatti, avere strati meno spessi dello spessore del filamento, né avere alcuna parete del pezzo di misura inferiore.

Normalmente, il materiale viene depositato uno strato alla volta per formare il pezzo uniformemente. Tuttavia, Jiang ha evidenziato come si potrebbero abbattere i tempi di produzione costruendo i pezzi trattando separatamente le diverse geometrie che li compongono, come da immagine (Jiang, 2020).

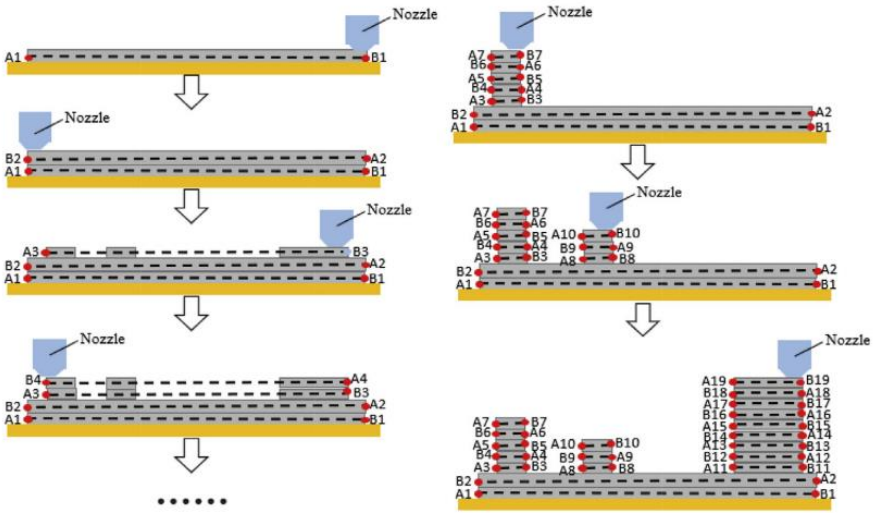


Figura 7: Processo strato per strato comparato al processo introdotto da Jiang.

I materiali impiegati nel FDM sono principalmente polimeri e ceramiche. Macchine FDM a basso costo (con prestazioni non paragonabili ai sistemi industriali) sono molto popolari anche a livello hobbistico per la stampa di oggetti direttamente da parte dei consumatori, essendo economiche e non ingombranti (Petrovic et al., 2011).

Sheet Lamination

Questo metodo consiste nella laminazione strato per strato di lastre di materiale, ciascuna rappresentante uno strato del pezzo, tagliate usando un laser a CO_2. Si possono legare tra di loro gli strati e successivamente tagliarli, oppure tagliarli e incollarli uno alla volta. Nei processi bond-then-form, la lastra passa attraverso un rullo scaldato che deposita su di essa un materiale collante, viene in seguito legata al substrato e tagliata secondo la forma voluta. I

principali vantaggi sono ridotta contrazione del pezzo, velocità di fabbricazione e varietà dei materiali disponibili.

Al contrario, nei processi form-then-bond, il materiale con uno strato adesivo viene tagliato

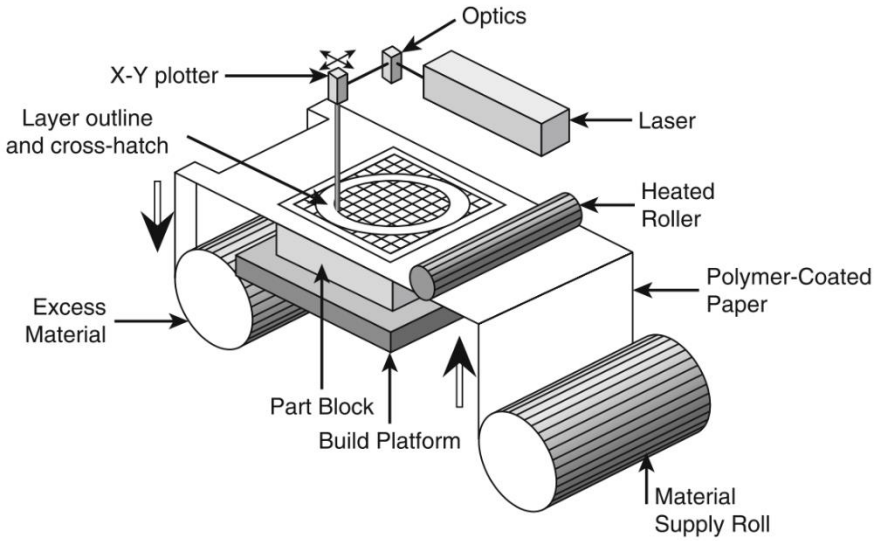


Figura 8: Processo di Sheet Lamination. Fonte: Gibson et al., 2016

nella forma necessaria e piazzato sullo strato precedente al quale si lega. Questo processo è utile per la costruzioni di pezzi con degli elementi interni difficili da creare in altri modi (Gibson et al., 2016).

I materiali usati possono essere polimeri, metalli o ceramiche. Questo processo viene utilizzato principalmente per la produzione di componenti elettroniche, data la possibilità di inserire dei cablaggi tra gli strati. Sebbene non sia il più preciso e gli strati possono occasionalmente scollarsi in condizioni estreme di utilizzo, questo metodo offre tempi di produzione contenuti, e i pezzi presentano pochi stress residui (Mehrpouya et al., 2019).

Vantaggi rispetto al Subtractive Manufacturing (SM)

I vantaggi dell'uso della fabbricazione additiva sono molteplici, soprattutto se vengono prese in considerazione quantità meno elevate, anche se con il passare degli anni la tecnologia sta

diventando sempre più efficiente e in grado di competere con le tecniche tradizionali anche in ambito di produzione di massa.

Nel 2012, Berman citava tre principali punti di forza dell'AM:

- La produzione a costi contenuti di prodotti customizzabili
- La possibilità di condividere facilmente i file CAD e di esternalizzare la produzione
- La velocità e semplicità della progettazione e della modifica del design di un pezzo

Pereira et al. (2019) si concentrano, invece, sul concetto di "complexity for free" e sulla flessibilità in fase di design del pezzo. La complessità gratuita è data dal fatto che utilizzando la fabbricazione additiva non c'è differenza in termini di processo tra il produrre un pezzo privo di elementi difficili da realizzare con tecniche sottrattive (canali, fori ecc.) e uno che ne è pregno. Con le lavorazioni a macchina CNC, infatti, è pressoché impossibile creare certi elementi, e nel caso in cui si possa fare, la lavorazione richiederebbe molto tempo.

Questa flessibilità viene sfruttata grazie alle tecniche di Design per la Fabbricazione Additiva (Design for Additive Manufacturing – DfAM), che permettono ai designers di costruire pezzi molto più leggeri e performanti in meno tempo e con meno materiale, tenendo sempre a mente l'impatto ambientale della produzione (Pour et al., 2016). Avere un inventario informatico di file CAD con macchine pronte a produrre i pezzi con lead time ridotti, inoltre, permette di passare ad un sistema Make-To-Order, eliminando di conseguenza quasi del tutto gli inventari fisici (Verboeket & Krikke, 2019). Lithgow et al. (2019) forniscono una modellizzazione di questo processo, riportata in figura.

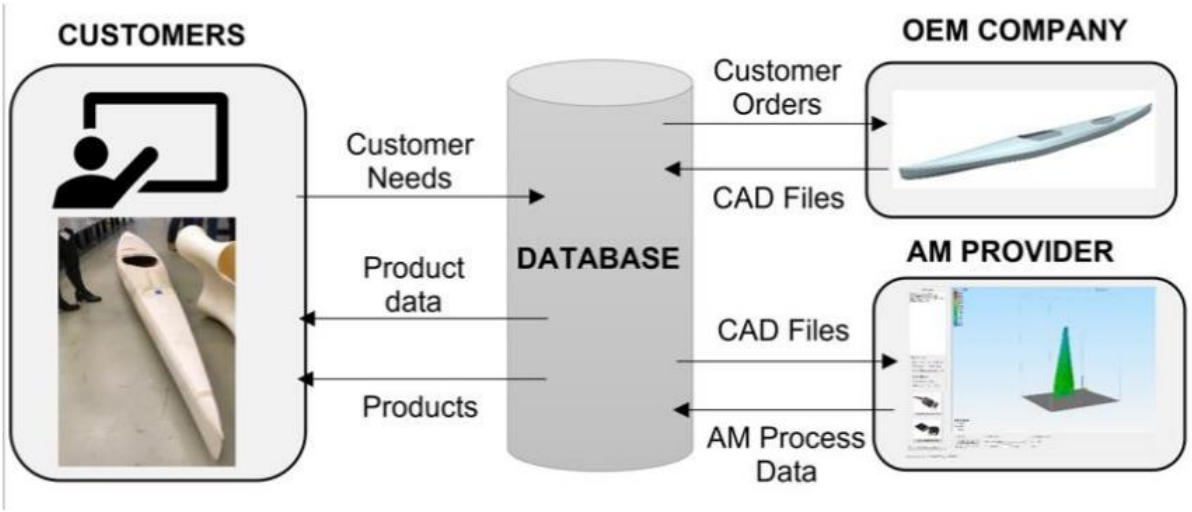


Figura 9: Fonte: Lithgow et al., 2019

I tempi di produzione minori sono diretta conseguenza anche del fatto che i tempi di set-up sono trascurabili, se non nulli. Inoltre, non vi sono attrezzature e vengono eliminati i tempi di cambio utensile.

Come sottolineato da Attaran, queste peculiarità favoriscono una Mass Customization a costi contenuti, permettendo ad ogni prodotto di essere unico e conforme alle esigenze del cliente. Inoltre, l'AM può ridurre i tempi di consegna grazie alla possibilità di decentralizzare la produzione, oltre che a generare un minore impatto ambientale e meno rifiuti, dato che le polveri e le miscele che avanzano dopo la produzione possono essere quasi totalmente riutilizzate (Kietzmann et al., 2015). L'aspetto della sostenibilità verrà approfondito nei prossimi capitoli con una sezione dedicata.

Dall'analisi della letteratura su può concludere che i vantaggi dati dall'AM sono derivanti principalmente dalla completa libertà nel design, dai lead time ridotti e dall'utilizzo del solo materiale necessario alla costruzione del pezzo. I primi due aspetti contribuiscono a rendere efficienti i prodotti nelle loro applicazioni, permettendo, per esempio, di costruire pezzi singoli o con funzionalità integrate dove prima venivano prodotti in parti e poi assemblati, oppure di alleggerire notevolmente i componenti di un velivolo riducendone le emissioni, e di diminuire drasticamente i tempi di consegna. L'ultimo punto, insieme ad un basso fabbisogno energetico, evidenzia il lato sostenibile della tecnologia.

Stato attuale

La Swerea Swedish Research (2017) ha evidenziato come l'interesse per il mercato dell'AM, negli ultimi anni, abbia seguito l'andamento della Hype Curve di Gartner, con un picco iniziale e una seconda fase di moderazione in cui la tecnologia è diventata "abitudine".

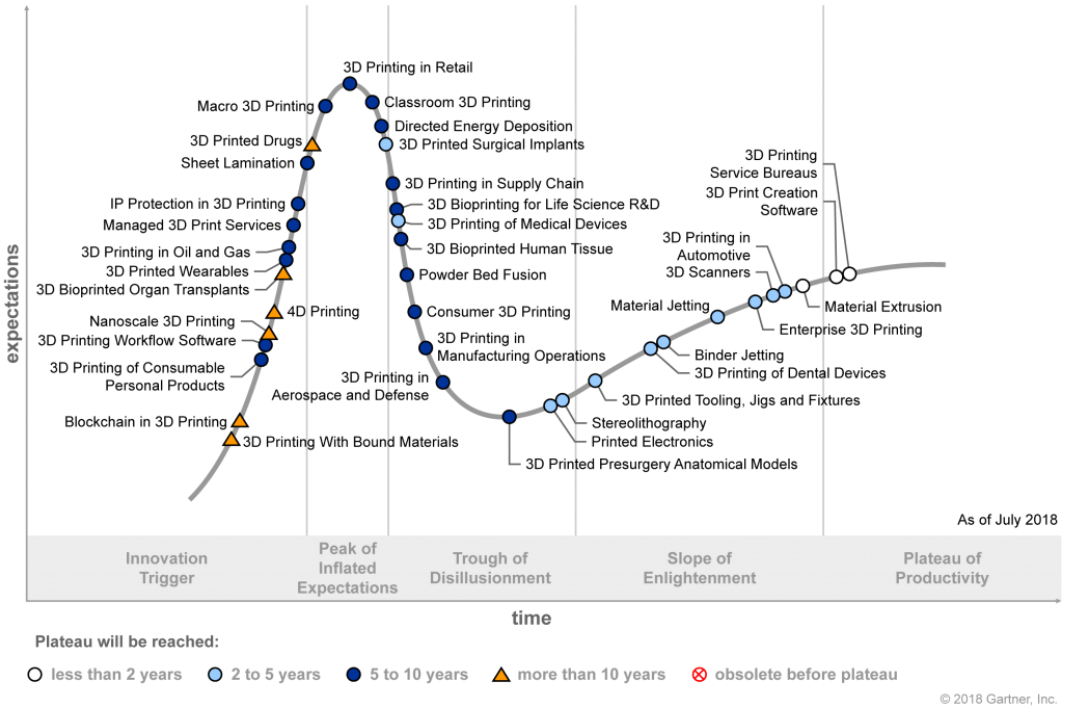


Figura 10: Hype curve al 2018. Fonte: www.fabbaloo.com

Il mercato, infatti, sta crescendo continuamente, con l'ingresso di nuovi attori che contribuiscono all'aumento della competitività, e quindi ad un efficientamento dei processi, all'introduzione di nuovi materiali innovativi e ad un abbassamento generale dei prezzi (Weller et al., 2015).

Un indicatore significativo della crescita del mercato può essere anche il numero di brevetti registrati annualmente. Esso è cresciuto costantemente dal 1977 in poi, con gli Stati Uniti in testa per quanto riguarda il numero di registrazioni (Chu & Su, 2014).

Settori in cui l'AM è più presente

L'Aerospace è senza dubbio il settore in cui l'AM è da più tempo impiegato. Alcuni componenti vengono prodotti totalmente tramite produzione additiva, e le serie raggiungono dimensioni

importanti, che continuano a salire. Airbus e GE Aviation guidano la transizione. Il motivo principale per cui l'AM si è fatto subito strada nel settore è senza dubbio quello della riduzione sensibile del peso dei componenti, che porta a grandissime economie per quanto riguarda il consumo di carburante negli aerei (Swerea Swedish Research, 2017).

Anche il settore medicale vede un'importante presenza della fabbricazione additiva. L'AM si è rivelata da subito, infatti, molto adatta per la produzione in piccole serie di protesi e impianti realizzati secondo le specifiche anatomiche dei pazienti. Ogni pezzo è quindi unico e concepito specificatamente per chi lo utilizzerà (Wohlers Associates Inc., 2017). L'AM è diffusissima anche nel settore dentale per la realizzazione di protesi odontoiatriche.

Nel settore Automotive, Honda e PSA hanno già iniziato a produrre alcuni componenti utilizzando la fabbricazione additiva. In particolare, Honda produce parti del telaio secondo le esigenze dei clienti, mentre PSA mira a ridurre il peso della struttura per realizzare economie significative. Inoltre, Audi e EOS, una delle aziende più presenti sul mercato della fabbricazione additiva, hanno siglato una partnership nel 2017 per l'introduzione dell'AM (Wohlers Associates Inc., 2017).

Come accennato in precedenza, anche le aziende sportive si stanno mobilitando e hanno già da qualche anno iniziato ad impiegare l'AM per la produzione di suole ultraleggere e altamente performanti. Oltre alla già citata partnership tra Adidas e Carbon, anche Under Armour ha iniziato a stampare in 3D parti della suole delle sue scarpe, partendo dal modello Architect (Wohlers Associates Inc., 2017).

Tra le principali aziende sul mercato delle macchine per la fabbricazione additiva troviamo Stratasys, 3D Systems, EOS, Envisiontec, Mcor e UnionTech. Israele è lo stato più attivo sul mercato con il 35,8% delle unità vendute nel 2017, seguito da Europa, Asia e Stati Uniti. Se si contano invece le unità vendute da 1988 in poi, gli Stati Uniti guidano con il 46,3% al 2017. Il mercato è in fase di crescita esponenziale sia per quanto riguarda i sistemi industriali, sia per i sistemi desktop (che costano meno di 5000 dollari). Tra i materiali più impiegati è sempre più in crescita il metallo, anche se i polimeri rappresentano più della metà del mercato, tra fotopolimeri (per stereolitografia) e polveri per la sinterizzazione.

Principali barriere tecniche da superare

Ford, nel 2014, identificava tre principali ambiti in cui era necessario bisogno di intervenire per fare crescere l'AM: l'introduzione di standard comuni, l'aumento dei tipi di materiale in commercio e l'abbassamento dei costi dei macchinari. Oggi, da un'analisi della letteratura e dei mercati, si può dire che siano stati fatti grandi passi in avanti su tutti i fronti, anche se non mancano le sfide da superare per una crescita ulteriore della tecnologia.

Nel 2017, infatti, Chen e Lin evidenziavano il bisogno di una maggiore precisione delle macchine riguardo alla finitura superficiale dei pezzi, o ad un'automazione dei processi di post-processamento per diminuire il lavoro manuale e aumentare la produttività. Inoltre, si sta notando una mancanza di personale specializzato nella gestione della fabbricazione additiva, tecnologia che richiede un certo livello di competenza per essere gestita, nonostante si stia lavorando alla semplificazione delle interfacce e del suo utilizzo. Queste figure professionali dovranno essere introdotte con la collaborazione degli istituiti, con l'introduzione di corsi appositi per formare tecnici specializzati e con corsi interni alle imprese che la utilizzano e possiedono un buon livello di know-how (Stavropoulos et al., 2020).

Con la crescita del mercato, queste sfide verranno affrontate e, probabilmente, risolte. Si può dire che la comunità scientifica è in accordo nel dire che la fabbricazione additiva sarà parte dell'industria del futuro, come per alcune imprese lo è già tuttora. Tuttavia, le problematiche e le innovazioni presentate nei prossimi anni potranno determinare a che livello questa tecnologia potrà essere introdotta, se sarà veramente competitiva con le tecniche tradizionali per le produzioni massive oppure se resterà un'ottima soluzione solo per alcuni tipi di prodotti.

2. Le filosofie Lean e Agile

Il Lean Thinking

Il concetto di Lean affonda le sue radici negli anni ’80. La Toyota, infatti, è stata l’azienda pioniera di questa filosofia e tutt’ora è leader mondiale nell’applicazione dei suoi processi cardine.

Nel 1988, Taiichi Ohno pubblica “Toyota Production System”, dove viene descritto il sistema operativo dell’azienda e vengono declinate tecniche che oggi sono largamente adottate e dalla comprovata efficacia come il Just In Time (JIT) e il Kanban, di cui si parlerà più avanti.

L’obiettivo finale del Lean Thinking è l’eliminazione di tutti gli sprechi nei processi aziendali. “Lean è fare di più con meno. Usare il minimo quantitativo di sforzo, energia, attrezzatura, tempo, spazio, materiali e capitale – dando al cliente esattamente ciò che vuole” (Womack & Jones, 1997).

Beitinger (2012) declina cinque principi fondamentali del Lean Thinking:

- La creazione di più valore focalizzandosi solo sul core business ed esternalizzando le altre attività;
- L’analisi del valore lungo tutta la Value Chain tramite strumenti quali il Value Stream Mapping;
- L’organizzazione dei flussi per rendere i processi fluidi, omogenei e senza eccessiva burocrazia;
- Passaggio al “Pull”, dove la produzione è guidata dalla domanda a valle piuttosto che dalle previsioni a monte;
- La dedizione al miglioramento continuo in un processo di progressivo avvicinamento alla perfezione.

Ohno identifica sette sprechi, che formano la classica sigla TIMWOOD.

- **Transportation** (trasporti): Aggiungere spostamenti inutili, oltre che ad essere un malus per la sostenibilità, non aggiunge valore al prodotto.

- **Inventory** (scorte): Lo stock non aggiunge valore ad un pezzo, quindi andrebbe ridotta al minimo. Idealmente, il livello di scorte dovrebbe essere zero, ma questo comporterebbe una serie di problematiche per cui la minima variabilità del sistema annullerebbe ogni tipo di vantaggio (Hopp & Spearman, 2008). Nell'ottica di mantenere il livello di scorte al minimo possibile, si implementano soluzioni come il Kanban e il JIT.
- **Motion** (movimenti): Durante le attività (soprattutto manuali) si fanno movimenti non necessari che vanno eliminati. In questi casi si analizza nello specifico ogni movimento dell'operatore cronometrando quali azioni contribuiscono alla creazione del valore e quali no. Successivamente, si eliminano le seconde e si cerca di ridurre al minimo il tempo impiegato per le prime. Economie di qualche secondo su ogni singola lavorazione possono risultare in cycle time ridotti di ore o addirittura di giorni sul lungo periodo.
- **Waiting** (attesa): I tempi di attesa sono legati al volume dell'inventario, quindi vanno eliminati.
- **Over-Production** (sovrapproduzione): Produrre più del necessario genera invenduti e quindi inventario per il periodo successivo. Inoltre, consuma delle risorse che avrebbero potuto essere reinvestite in attività più redditizie.
- **Over-Processing** (processo): alcuni processi potrebbero aggiungere un valore non richiesto dal mercato o non essere efficienti, e quindi aumentare inutilmente il cycle time.
- **Defects** (non qualità): ogni prodotto difettoso è, chiaramente, uno spreco, perciò ogni operazione dovrebbe essere il più ottimizzata possibile, per generare un basso numero di difetti. Per migliorare sotto questo aspetto si può introdurre la metodologia Six Sigma.

Negli ultimi anni, si è iniziato ad aggiungere un ottavo spreco, che ha acquisito sempre più importanza ed è diventato centrale: la sostenibilità. È fondamentale in questo periodo, infatti, sviluppare processi carbon free e, più in generale, sostenibili. Il Lean Thinking può venire in aiuto in questo senso, grazie agli strumenti di analisi e riduzione degli sprechi. La riduzione degli sprechi TIMWOOD contribuisce già significativamente, in maniera indiretta, all'abbassamento delle emissioni grazie ad un efficientamento generale dei processi, ma

applicare la filosofia lean considerando le emissioni alla stregua di un vero e proprio spreco potrebbe essere un fattore molto importante all'interno della transizione energetica che si sta affrontando.

Le tecniche più utilizzate

Value Stream Mapping (VSM)

Sviluppata nel 1995, questa tecnica è fondamentale per il riconoscimento degli sprechi lungo tutta la catena del valore. Il VSM consiste nel riassumere visualmente tutti i processi, dal fornitore al cliente, mettendo a disposizione una schematizzazione dettagliata del quadro generale (Singh et al., 2019). Per risolvere un problema è fondamentale, infatti, prima di tutto avere in mente in maniera più chiara possibile quale sia la situazione attuale.

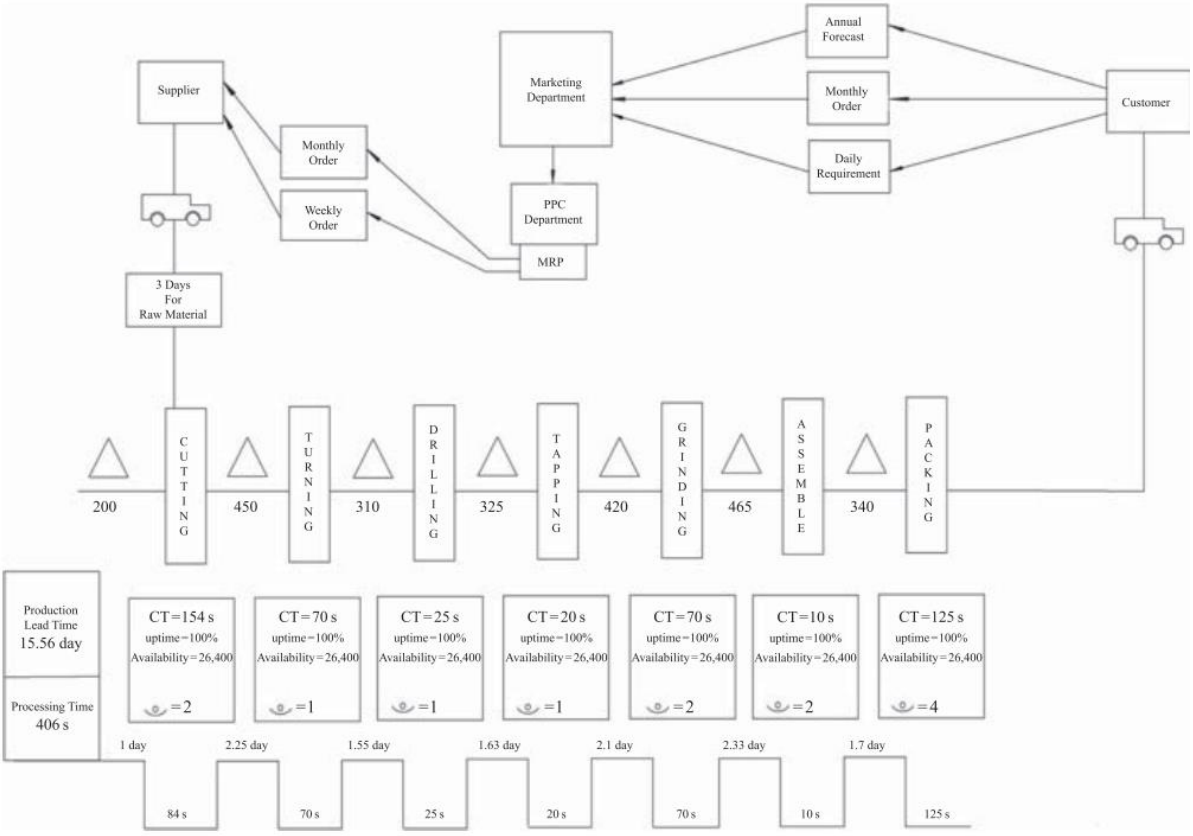


Figura 11: Esempio do VSM. Fonte: (Singh et al., 2019)

Just In Time (JIT)

Il JIT è uno stato ideale in cui "i giusti componenti arrivano alla linea di assemblaggio al tempo richiesto e nelle quantità richieste" (Ohno, 1988). Questo permetterebbe di raggiungere un

livello di inventario pari a zero. Tuttavia, l'implementazione del JIT richiede linee che lavorano in maniera quasi perfetta, con il minimo tasso di guasti e di difettosità, perché questa tecnica non perdona gli errori imprevisti. Si può dunque dire che il JIT sia una filosofia, intrinsecamente legata alle idee Lean, di progressiva ricerca della perfezione nei propri processi e di annullamento dell'inventario. Bisogna aggiungere però che questa rigidezza nel voler avere ciò che è necessario al momento necessario impone una grande pressione ai fornitori, che sono a volte costretti a firmare contratti con tempi di consegna strettissimi e penalità molto alte, proprio perché una mancata consegna diventa una perdita enorme per la produzione.

Kanban

Molto legato al JIT è il sistema kanban, tanto da fare pensare che possano essere la stessa cosa. Tuttavia, non è così: il kanban è il mezzo (o uno dei mezzi) attraverso il quale si raggiunge il JIT. Questo sistema, spiega Ohno, prende ispirazione dai supermercati. Ogni componente è accompagnato da un'etichetta (kanban). Quando il componente (o numero prefissato di componenti) viene consumato il kanban viene trasferito al fornitore, o alla linea precedente, per ripristinare il livello di stock di quel pezzo. In questo modo, non si avrà mai in inventario più pezzi di quanti siano i kanban in circolazione. È come quando, al supermercato, una volta preso un prodotto dallo scaffale, viene ripristinata la situazione ideale riposizionandone subito un altro al suo posto.

Il kanban è un sistema PULL, perché la produzione del componente avviene solo se c'è un input a valle della linea (il pezzo che viene usato e il kanban che si sposta). È quindi un processo order driven. Essere pull comporta diversi benefici: riduce il WIP (numero di pezzi all'interno della linea), rende il flusso di sistema più liscio, riduce i costi e migliora la qualità (Hopp & Spearman, 2004).

Six Sigma

Il principio del Six Sigma è quello di mantenere un determinato livello di qualità dei prodotti, attraverso la riduzione della variabilità dei processi e controlli più stringenti. Le tolleranze non devono essere necessariamente poste a ± 3σ dalla misura ideale (Six Sigma perché il livello di tolleranza viene posto in un intervallo di sei deviazioni standard rispetto alla misura target). Si può intendere il Six Sigma come la ricerca costante della perfezione a livello qualitativo, ricerca che costituisce il leitmotiv del Lean Thinking.

Agile management: flessibilità e reattività

Nella sezione precedente si sono trattati i principi fondamentali della filosofia Lean. In base alle sue caratteristiche, si può affermare che l'ambiente di applicazione ideale include volumi alti, bassa variabilità (prodotti standardizzati) e domanda prevedibile (o certa in caso di sistemi pull). Come impostare la propria strategia, dunque, se ci si trova in un mercato imprevedibile, che impone di essere reattivi ad ogni (frequente) variazione della domanda (Harris, 2004)?

Turner et al (2020) evidenziano come, nel mercato attuale, l'ambiente prevedibile, costante e con prodotti standardizzati stia diventando sempre più obsoleto, per fare posto alla mass-customization e al co-design. Il mercato varia le sue esigenze e chiede possibilità di scelta più ampie con tempi sempre più ridotti. Le aziende, inoltre, stanno cercando di rendere il cliente sempre più partecipe in alcune scelte per rendere unico il proprio prodotto e migliorare l'esperienza di acquisto.

Flessibilità

Il concetto di agilità pone l'accento sulla flessibilità, ovvero la capacità di rispondere rapidamente ai cambiamenti nella domanda, sia in termini di volume che di varietà (Christopher, 2000). Per raggiungere questo obiettivo, è necessario conoscere molto bene il mercato. Siccome la domanda è difficile da prevedere, si tende ad avere un alto livello di inventario per i processi push.

Per essere flessibili, tutti i processi della Supply Chain devono comunicare alla perfezione. Questo implica la scelta di pochi fornitori, con cui si sviluppa una partnership di lunga durata, basata sulla quasi totale condivisione di informazioni e integrazione dei sistemi. In questo modo, si evitano incomprensioni e si snellisce la burocrazia, velocizzando le operazioni ed evitando anche conseguenze spiacevoli, come ad esempio l'effetto Bullwhip.

A questo proposito, Tarafdar & Qrunfleh (2017) dimostrano che una partnership strategica con i fornitori è strettamente correlata alla performance della catena del valore di un'azienda. Un'altra ipotesi confermata è che il Postponement costituisce un fattore determinante per il tasso di reattività al mercato.

Strategie ibride

Nella maggior parte delle situazioni, sposare al 100% solo una di queste due strategie non è redditizio, ma normalmente si adotta una strategia ibrida per cui una parte della Supply Chain è Lean, l'altra è Agile (Christopher, 2000).

Decoupling point (DP)

Il decoupling point è il punto in cui arriva l'ordine del consumatore all'interno della catena del valore. Prima di esso si hanno componenti standardizzati, prodotti sulla base delle previsioni. Dal DP in poi, invece, i prodotti rispecchiano i desideri di customizzazione del cliente (Yang & Burns, 2003). La posizione ottimale del DP è considerata generalmente vicino al cliente, in un punto in cui i tempi di consegna sono minori dei lead time imposti dal mercato, in modo da poter impostare un sistema make-to-order.

Il DP è, solitamente, il punto usato come divisione tra strategia Lean e Agile. Prima, infatti, con processi forecast-driven, prodotti standardizzati e volumi alti è utile applicare la filosofia Lean, dopo, invece, con necessità di differenziazione e di rispondere velocemente ai cambiamenti nella domanda, diventa fondamentale essere flessibili.

Postponement – il caso Benetton

Per un'azienda è importante posticipare le attività della Supply Chain fino a quando non si hanno informazioni dettagliate sulla domanda. Questa strategia è detta Postponement, e coinvolge anche il DP.

Yang & Burns (2003) fanno un esempio molto famoso, quello di Benetton, che decise di produrre le proprie magliette tutte in bianco, quindi non partendo da un tessuto colorato, e di colorarle successivamente, quando sarebbero stati in possesso di dati più dettagliati riguardo agli ordini e ai colori di tendenza in ogni stagione. Di fatto, il DP fu spostato a valle della Supply Chain, dagli stabilimenti di produzione dei tessuti colorati a quelli di tintura finale delle magliette. Ciò permise una riduzione dei livelli di inventario, un tasso di servizio maggiore e un minore tasso di difettosità.

Considerazioni finali

Sebbene una strategia Lean sia utile all'organizzazione, all'efficacia e all'efficienza dei processi, non c'è un vero legame causale tra la sua adozione ed un aumento della reattività ai cambiamenti nella domanda. Al contrario, una strategia Agile si dimostra efficace (Qrunfleh & Tarafdar, 2013). Pertanto, adottare solo una di queste due strategie rinnegando l'altra non può che portare dei malus sotto l'uno o l'altro aspetto. Se per un'azienda è necessario essere reattiva, non potrà comunque non tenere in conto i principi Lean se non vuole incorrere in cycle times molto lunghi (che comunque aumentano il tempo impiegato dal prodotto per arrivare al mercato) e costi ingenti.

Le filosofie Lean e Agile non sono dunque in antitesi, ma vanno considerate come complementari. A supporto di questa ipotesi, Iqbal et al. (2020) dimostrano che una strategia di produzione che considera entrambi gli aspetti è associata ad una performance migliore a livello operazionale, finanziario e di mercato.

3. Il ruolo della fabbricazione additiva nella riduzione degli sprechi

Come detto nel capitolo riguardante il Lean Management, il suo obiettivo principale è quello di ridurre gli sprechi lungo tutta la catena del valore. Tuttavia, considerando il metodo operazionale con cui questa filosofia viene applicata, si può facilmente comprendere che mantenendo metodi di produzione tradizionali si possono ottenere grandissimi risultati, ma senza eliminare del tutto questi sprechi. Nonostante si punti sempre alla soluzione ideale, la riduzione è solo di tipo incrementale, e si arriverà sicuramente ad un punto di asintoto in cui non si può più ottenere una riduzione significativa.

Ghobadian et al. (2020) suggeriscono che con un'adozione massiccia dell'AM gli sprechi nel mirino del Lean Thinking possano essere azzerati invece che ridotti, seppur anche in maniera significativa.

La tabella che segue mette in relazione i 7(+1) sprechi introdotti da Ohno e in quale misura l'AM può potenzialmente intervenire per la loro eliminazione.

Category of waste	Potential for elimination/significant reduction
Defects	Close to elimination
Unnecessary inventory	Elimination/close to elimination
Waiting	Elimination/close to elimination
Transportation	Significant reduction
Inappropriate processing	Elimination/close to elimination
Over production	Elimination/close to elimination
Unnecessary motions	Elimination/close to elimination
Physical environment externality	Significant reduction
Sustainability	Reduced usage of material, energy, etc.

Figura 12: Fonte: Ghobadian et al. (2020)

Basandosi su un'analisi della letteratura e dello stato attuale della tecnologia, come evidenziato in figura, si può affermare che l'AM ha le potenzialità per intervenire massicciamente nella riduzione degli sprechi, e che è una tecnologia in linea con i principi di sostenibilità che sono e dovranno essere le colonne portanti dell'industria.

Nei paragrafi successivi si evidenzieranno nello specifico le proprietà, i vantaggi e i limiti dell'AM nell'ottica della riduzione di ognuno dei sette sprechi (TIMWOOD). Un paragrafo sarà dedicato interamente alla sostenibilità.

Trasporto

Il trasporto può essere inteso sia come trasporto interno, ovvero di semilavorati o materie prime tra due operazioni consecutive, oppure come trasporto esterno, inbound se si tratta di materie prime spedite dai fornitori, outbound dalla produzione al cliente.

Per quanto riguarda l'aspetto interno, innanzitutto, si deduce da quanto trattato nei capitoli precedenti che la logistica dell'AM è ridotta all'osso. Si trasportano solamente le materie prime o i prodotti finiti, non esistono magazzini intermedi o buffer tra macchine,(Tuttavia possono essere necessarie successive operazioni di finitura, da una semplice pallinatura a un passaggio in stazioni di lavorazione sottrattiva (come avviene per i semilavorati di fonderia). In tal caso occorre prevedere dei magazzini intermedi)

Il pezzo viene costruito direttamente e interamente in una sola fase, due se si rende necessario un trattamento termico. Inoltre, il trasporto del materiale di partenza, che siano polveri o polimeri, è meno complicato e richiede meno spazio rispetto a quello dei grezzi di partenza della fabbricazione sottrattiva. Le economie derivano anche dal fatto che, essendo l'AM più efficiente nell'uso del materiale, a parità di volume prodotto servirà meno polvere rispetto al volume dei pezzi da lavorare tramite macchina CNC, oltre al fatto che una polvere o una resina occupa già di per sé meno volume rispetto ad un grezzo solido, a cui, peraltro, dovrà essere sottratto del materiale per arrivare al pezzo finale.

Con una produzione centralizzata, adottata oggi dalla maggior parte delle imprese, e tecniche di produzione tradizionali, l'aspetto logistico è molto complesso e, soprattutto, richiede che vengano ricoperte tratte molto lunghe, che implicano anche costi considerevoli. La scelta di produrre nel minor numero possibile di stabilimenti è, però, giustificata da una serie di vantaggi (Kleer & Piller, 2019):

- Economie di scala
- Riduzione dell'inventario

- Efficientamento delle operazioni d'acquisto

Con l'avvento dell'AM, tuttavia, si è visto che l'inventario non è più necessario, e che le economie di scala non sono realizzabili come per i processi tradizionali.

Ragionando sia in ottica Lean che Agile, quindi, la soluzione più conveniente diventa quella di frammentare la produzione spostandola verso il cliente, non avendo più un solo stabilimento centrale, ma molti e più piccoli. Con l'aumento dei produttori di materiali ed un sourcing locale, si possono ridurre al minimo i trasporti necessari, e insieme ad essi anche i tempi di consegna del prodotto finito. Nel prossimo capitolo si analizzerà nel dettaglio questo aspetto in un paragrafo dedicato ai pezzi di ricambio.

Inventario

Come accennato nel paragrafo precedente, l'AM permette un abbattimento del volume degli stock, sia di materie prime che di prodotti finiti. "Nel 2011, c'erano 537 miliardi di dollari in inventari, equivalente al 10% del fatturato di quell'anno" (Thomas & Gilbert, 2015). I magazzini richiedono spazio e risorse per essere mantenuti, e costituiscono un "imprigionamento" del capitale, che rimano bloccato fino a quando questi prodotti non vengono venduti. Il problema è piuttosto comune, specialmente in mercato con lead times ridotti e poco prevedibili, in cui si fornitori si trovano costretti a sostenere costi di immagazzinamento molto alti.

Grazie all'AM, essendo più vicini al cliente e passando ad una produzione Make-To-Order, il bisogno di tenere voluminosi inventari viene meno, e con esso anche i costi associati.

Movimenti

Al netto del caricamento del materiale di partenza, del setup e della rimozione del pezzo, non viene effettuato nessun intervento esterno. Ciò avviene anche nelle linee classiche, però su più macchine e in più stazioni di lavoro. È opportuno ricordare, invece, che nella fabbricazione additiva il pezzo viene costruito da zero in un solo passaggio.

Tutto viene eseguito in una singola macchina. Per quanto riguarda la rimozione delle strutture di supporto e la pulitura finale, molte aziende offrono soluzioni automatizzate anche per queste operazioni. Rispetto ad una linea tradizionale, quindi, i movimenti necessari alla

produzione del pezzo sono ridotti sensibilmente, sia per quanto riguarda le macchine, che sono dotate di software per calcolare le traiettorie più brevi, sia per quanto riguarda l'uomo. La tendenza è, infatti, verso una progressiva riduzione della presenza umana nella linea, a favore di un'automazione sempre più spinta. D'altronde, la stessa via è stata percorsa dalle linee di produzione tradizionali.

Tempi d'attesa

I tempi d'attesa sono un problema molto sentito nelle linee tradizionali. Se si vuole mantenere un certo livello di utilizzo e un certo throughput della linea, infatti, necessariamente si dovranno accettare dei buffer (code) prima di ogni macchina. La legge di Little definisce infatti il numero di componenti nella linea come il prodotto tra il tasso di produzione, TH(throughput), e il cycle time della linea, CT (Hopp & Spearman, 2008).

$$WIP = TH * CT$$

Dove il WIP (Work In Progress) è il numero totale dei pezzi in media all'interno della linea. A parità di TH, quindi, con più WIP ogni pezzo impiegherà più tempo ad attraversare la linea, questo perché essendoci più pezzi nel sistema si generano code più lunghe. Se il WIP è troppo basso, però, il TH ne risente perché le macchine avranno dei tempi morti dove non arrivando pezzi, non potranno lavorare, risultando quindi in un minor TH.

Avere un WIP abbastanza alto da permettere alla linea di lavorare al massimo TH possibile, quindi, è necessario per una linea tradizionale. Di conseguenza, lo sono anche i tempi d'attesa.

In molte linee il tempo effettivo di produzione può essere molto inferiore al 50% del VAT (Value Adding Time). Ciò significa che ogni pezzo è per la maggior parte del tempo in attesa della lavorazione successiva.

Nel paragrafo precedente, relativo ai movimenti, si è detto che la produzione di un pezzo in fabbricazione additiva, al contrario di quella tradizionale, avviene continuativamente in una sola fase. Sebbene quindi i VAT possano risultare più lunghi nell'AM, non solo i CT risultano più brevi, ma sono pressoché coincidenti con il VAT. Di conseguenza, si può concludere che il tempo in cui un pezzo resta nella macchina nella fabbricazione additiva è quasi totalmente speso per aggiungere valore al pezzo. Gli sprechi sono ridotti.

A supporto di queste affermazioni si porta un case study effettuato da Smelov et al. (2014), in cui viene redatta una Value Stream Map di una linea tradizionale per la produzione di una turbina, che viene poi sostituita da una con tecnologia AM.

La produzione mensile era di 84 pezzi. Fu redatta una VSM per valutare al meglio lo stato della situazione. Dai dati raccolti emerse che la durata totale del processo di fabbricazione era di 695 minuti, il VAT era invece di 115, ovvero il 16,5%. La maggior parte del tempo, 210 minuti (circa il 30%), era dovuto all'attesa tra un'operazione e la successiva.

Gli studiosi hanno poi redatto una VSM dello stato futuro in cui venivano introdotte migliorie nel sistema, utilizzando l'AM, ottenendo i seguenti risultati.

Indicator	Current state	Planned state
Time of value adding	695 min	420 min
Total time of operation	115 min	360 min
Transportation	50 min	15 min
Readjustment	320 min	35 min
Storage	210 min	10 min
Stock	965 pcs	10 pcs
WIP	250 pcs	5 pcs
Number of operators	14 persons	5 persons

Figura 13: Risultati ottenuti dal case study di Smelov et al. (2014).

Il VAT passa dal 16,5% all'86%, e il tempo di attesa diventa il 2,4%. Inoltre, sebbene il tempo di costruzione sia più alto, il tempo totale dell'operazione diminuisce. Diminuiscono sensibilmente anche il WIP, lo stock e il numero di operatori necessario.

Sovrapproduzione

La sovrapproduzione è legata inevitabilmente all'inventario e al tasso di difettosità. Se si produce più di quanto richiede il mercato, infatti, l'invenduto genererà dello stock. Se si ha un elevato tasso di difettosità, invece, diventa necessario produrre più pezzi per avere la stessa quantità di prodotti vendibili.

L'introduzione dell'AM e l'utilizzo di tecniche di pianificazione della produzione contribuiscono al drastico abbassamento dei lead times (Chergui et al., 2018), permettendo in molti casi il

passaggio al Make-To-Order. Grazie a questo sistema, il valore della domanda è certo, dato dalla somma degli ordini, e viene eliminata totalmente la sovrapproduzione. Nel caso in cui il passaggio al MTO non sia possibile, con l'AM si rimane ad un tasso di sovrapproduzione tra il 3 e il 6%.

Lavorazioni non necessarie

Le operazioni da svolgere per produrre un pezzo tramite AM sono ridotte, se si considera che la costruzione del pezzo avviene in una sola fase. Inoltre, la libertà di design offerta dalla tecnologia permette di creare pezzi molto complessi o integrati, che non necessitano di assemblaggio (Atzeni & Salmi, 2012).

Considerando questo punto di vista, comparando le lavorazioni effettuate utilizzando macchine CNC con la produzione di moduli e successivo assemblaggio, con linea dedicata, risulta evidente che in questi casi l'AM elimina lavorazioni anche molto complesse da eseguire, che a loro volta, come visto in precedenza, generano sprechi.

Ogni spreco, infatti, è intrinsecamente collegato agli altri. Alimentando uno spreco inevitabilmente si favorisce la creazione di un ciclo vizioso per il quale anche altri sprechi vengono generati, mentre tagliandolo o eliminandolo se ne favorisce la riduzione.

Difetti

Nell'AM, il tasso di difettosità è condizionato da molti parametri, sia strettamente legati al processo che causati dalle condizioni ambientali in cui avviene la costruzione. Principalmente, i difetti sono collegati al tipo di processo e al materiale utilizzato.

Tra i fattori che posso aumentare/diminuire la presenza di difetti si evidenziano:

- Condizioni atmosferiche nella camera di costruzione
- Parametri di costruzione (temperatura, velocità di scansione)
- Trattamenti di post-processamento
- Pattern di scansione
- Posizione nella macchina (Nel caso in cui vengano prodotti più pezzi contemporaneamente)

- Geometrie del pezzo
- Orientamento del pezzo

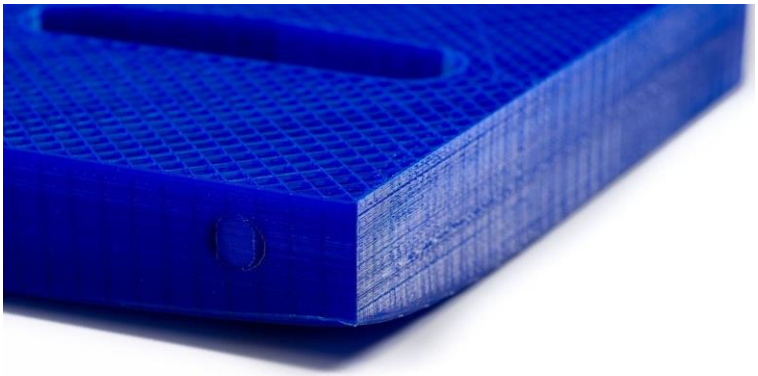


Figura 14: Esempio di warping. Fonte: all3dp.com

Durante il processo di costruzione, il riscaldamento e l'immediato raffreddamento del materiale, insieme ai parametri di velocità (sia del laser nei processi che ne richiedono l'uso, sia del movimento della piattaforma nella SL) costituiscono un ambiente favorevole alla formazione di piccole cricche, zone non completamente fuse o bolle d'aria, quindi zone di porosità. Uno dei difetti più comuni nel FDM è il warping, ovvero il rialzo degli stati inferiori nelle zone inferiori degli angoli del pezzo. Esso è dovuto al fatto che i primi strati stampati si raffreddano troppo rapidamente, causando un disequilibrio e venendo "tirati" verso l'alto dagli strati superiori che si contraggono. Bisogna precisare che il warping è un difetto comune principalmente nelle stampanti desktop.

Riassumendo, si può dire che i principali difetti nella fabbricazione additiva possono essere:

- Legati alla geometria del pezzo, come restringimento e warping;
- Legati alla qualità superficiale, come eccessiva rugosità, effetto "staircase" (strati troppo spesi, che risultano, appunto, in una sorta di scala ai lati del pezzo quando esso dovrebbe risultare curvo) o stringatura (fili di materiale che rimangono attaccati al pezzo);

- Legati alle proprietà meccaniche, come porosità e poca resistenza.

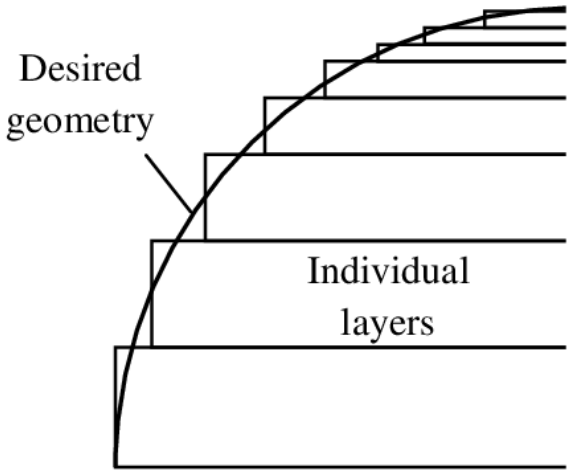


Figura 15: Staircase effect: Fonte: (Brooks et al., 2011)

Per ridurre la presenza di questi difetti, si sottopone il pezzo a trattamenti termici di distensione, Hipping, pallinatura o trattamenti di finitura superficiale.

Nonostante tutto, però, l'opinione rilevata dall'analisi della letteratura scientifica, che trova conferma anche in figura 12, è quella che l'impiego dell'AM riduca il tasso di difettosità rispetto alle tecniche tradizionali, fino quasi a portarlo vicino allo zero una volta che il processo è stato ottimizzato. Il post-processamento gioca un ruolo fondamentale sotto questo aspetto, specialmente per le componenti metalliche. I trattamenti di cui sopra, infatti, contribuiscono in maniera significativa a conferire ai pezzi le proprietà ricercate, abbassando il rischio di ottenere prodotti difettosi.

Sostenibilità

Negli ultimi anni è stato impostato un cambio di rotta verso la completa sostenibilità e l'azzeramento delle emissioni di gas serra da parte delle attività umane sul pianeta. Il settore manifatturiero non è da meno, ed è per questo motivo che le nuove tecnologie introdotte sul mercato sono giudicate anche e soprattutto riguardo alla loro coerenza con questi principi. Gli studi riguardanti la sostenibilità della fabbricazione additiva sono relativamente recenti e non estremamente numerosi ma, come si vedrà in seguito, sono piuttosto concordi nell'affermare che questa tecnologia ha il potenziale per ridurre le emissioni di gas inquinanti, considerando l'intero ciclo di vita del prodotto.

Nadagouda et al. (2020) affermano che l'AM, riducendo gli sprechi grazie al processo additivo e non sottrattivo, dando la possibilità di riutilizzare il materiale in eccesso ed essendo più efficiente delle tecniche tradizionali, riduce la domanda di energia legata al consumo dei materiali. Come visto anche nei capitoli precedenti, i risultati possono variare in maniera determinante se si prende in esame una tecnica piuttosto che un'altra. Uno studio di Gebler et al. (2014) evidenziava già gli enormi benefici che si possono trarre dall'utilizzo dell'AM per la produzione. In particolare, si è analizzato separatamente ogni mercato in cui l'AM era diffuso, e creato un modello secondo cinque scenari, dove il primo rappresenta la non adozione della tecnologia, fino ad arrivare al quinto, che rispecchia una situazione in cui l'AM viene usato e si è evoluto al suo massimo potenziale.

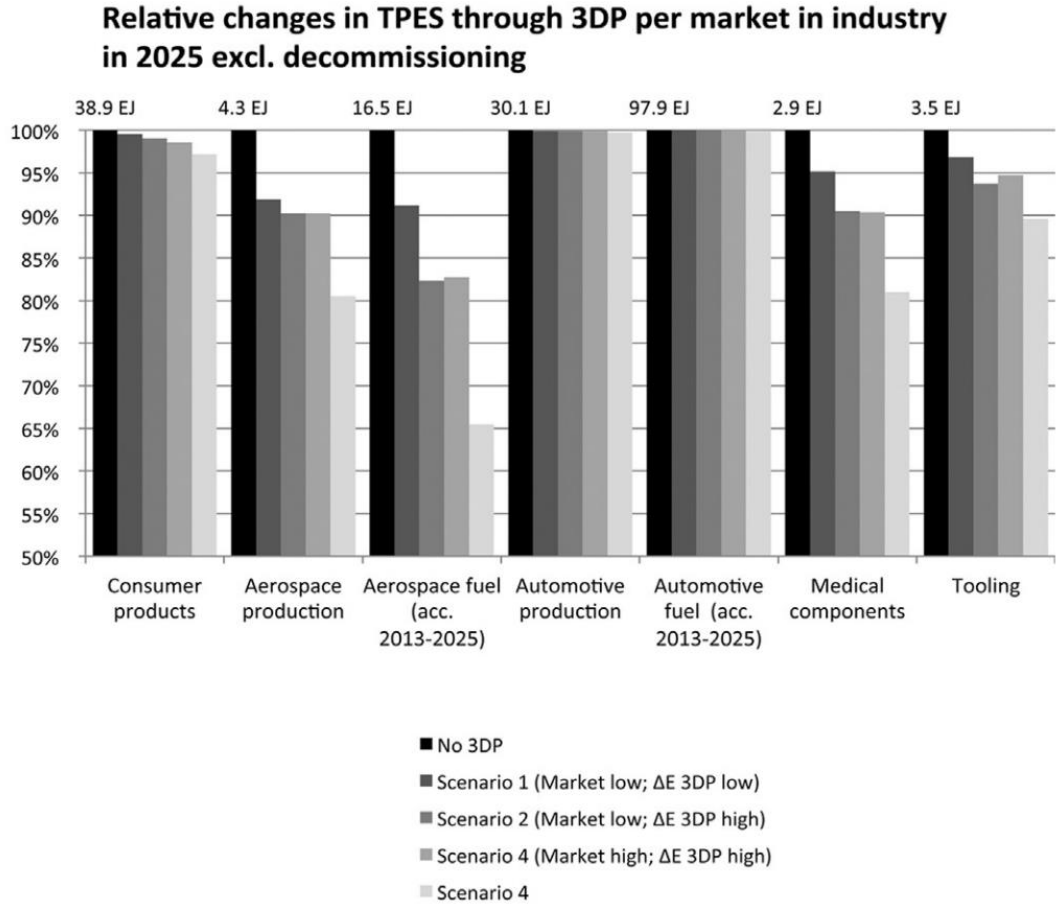


Figura 16: Potenziale riduzione del fabbisogno totale di energia in 4 scenari. Fonte: Gebler et al. (2014).

Per alcuni settori, come l'Aerospace, i dati sono molto promettenti. I guadagni arrivano principalmente dal risparmio nell'uso di carburante dovuto alla forte riduzione del peso dei

veicoli fabbricati tramite AM. La libertà del design, come si è detto, permette la realizzazione di componenti dalle forme complesse con le stesse proprietà meccaniche di quelli tradizionali, ma con vuoti all'interno o, più in generale, con forme che richiedono molto meno materiale e li rendono sensibilmente più leggeri.

Tuttavia, gli esperti sono d'accordo nell'affermare che queste economie potranno avere un ruolo significativo solo nel caso in cui l'AM verrà adottato e utilizzato anche per la produzione di massa di questi componenti. In questo momento storico, nel 2020, si può dire che questo stia accadendo in parte. Alcune aziende, come General Electric e Airbus, si stanno muovendo in questa direzione (AMFG, 2019).

Inoltre, il mercato sta seguendo una crescita esponenziale, nuovi player continuano ad entrare e a portare innovazioni e migliorie, le macchine diventano sempre più efficienti e meno costose, rendendo l'AM appetibile per volumi sempre più grandi.

Nella parte restante del capitolo, si effettuerà un'analisi più approfondita sulla sostenibilità dell'AM, esaminando tre macroaree: il fabbisogno energetico, le emissioni di CO_2 e la gestione dei materiali.

Fabbisogno energetico

Il consumo energetico della catena del valore dell'AM è strettamente legato non solo al tipo di processo, e di conseguenza al materiale utilizzato, ma anche ai parametri inseriti. Materiali con granulometria di polvere più sottile e alta densità, come un minor spessore dello strato, porteranno ad un maggior consumo energetico. Ottimizzando l'impostazione di questi parametri è possibile aumentare l'efficienza energetica senza ridurre la qualità del prodotto (Z. Liu et al., 2018). Inoltre, alcune tecniche richiedono dei gas inerti di copertura, per creare un ambiente adatto alla reazione che si vuole ottenere (fusione, sinterizzazione ecc). Normalmente, viene impiegato dell'argon con flussi intorno ai 50 litri/ora.

Per quanto riguarda l'aspetto ambientale, esso si dimostra, nell'AM, influenzato per la maggior parte dal consumo di energia. Nella tabella seguente si mettono a confronto i Global Warming Potential (GWP) di alcuni processi di fabbricazione additiva: si può subito notare come ci siano differenze piuttosto marcate tra una tecnica e l'altro.

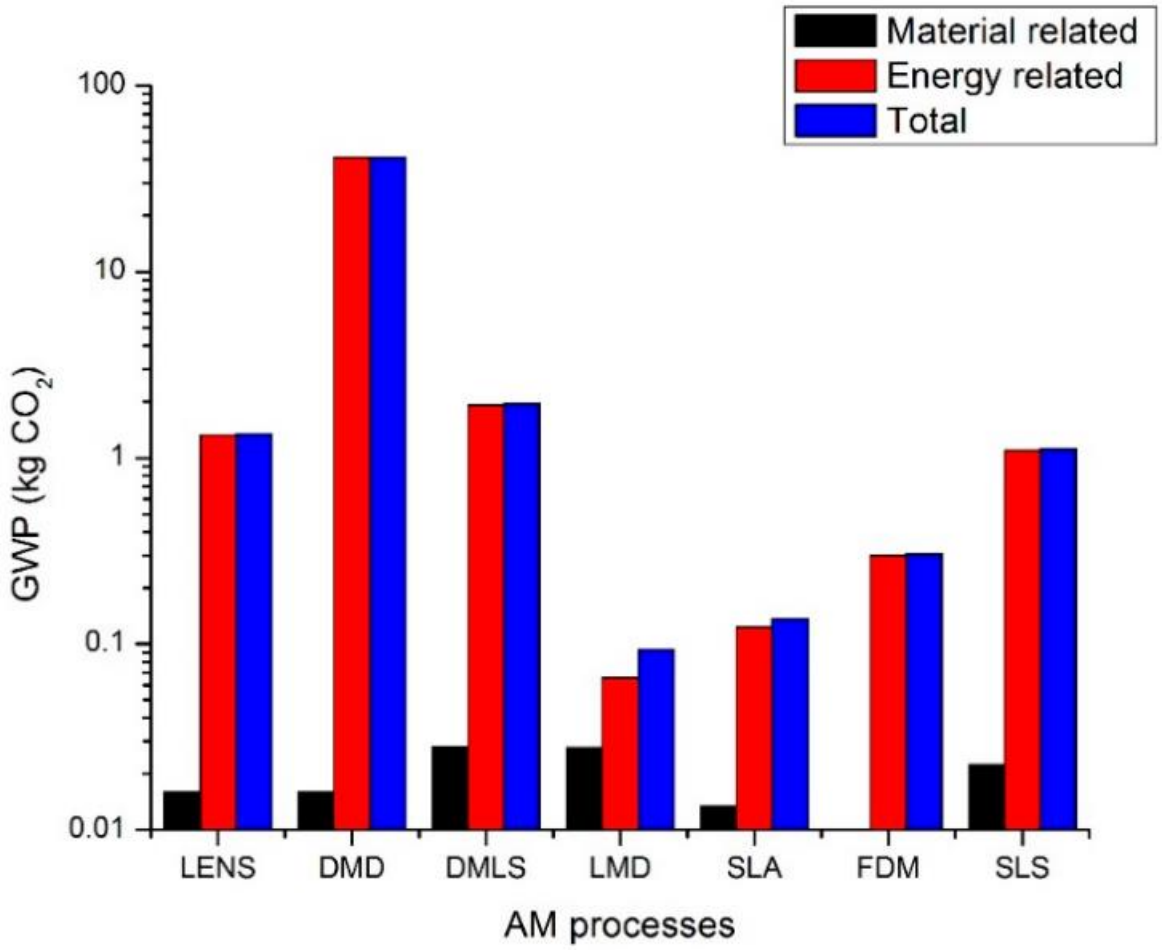


Figura 17: GWP per diversi processi di fabbricazione additiva. Fonte: Liu et al., (2018).

In figura 17 si può notare la differenza di quasi due ordini di grandezza tra le emissioni della più sostenibile e della più inquinante. In generale, escluso il LMD (Laser Material Deposition – appartenente al gruppo dei processi DED, quindi ottimizzata sia nell'impiego del laser che del materiale) i processi che utilizzano la plastica richiedono meno energia rispetto a quelli dove si utilizza un laser.

Si nota anche come SLA e FDM risultino avere un impatto ambientale legato ai materiali molto vicino allo zero. Questo è dovuto all'alto tasso di riutilizzo delle resine polimeriche coinvolte nella SLA, mentre nel FDM alla capacità di non sprecare il materiale plastico del filamento.

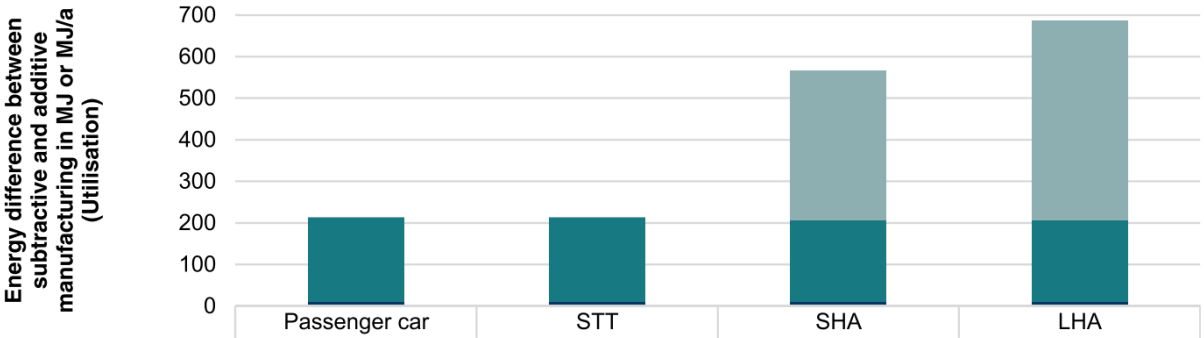
In relazione con i sistemi di produzione tradizionali, per quanto riguarda la sola produzione, Kellens et al., (2017) rilevano che il consumo specifico di energia (Specific Energy Consuption – SEC) della fabbricazione additiva è di 1 o 2 ordini di grandezza superiore a quello delle

lavorazioni a macchina CNC o dell'injection moulding, riconoscendo però che sono risultati che riguardano il solo aspetto produttivo, come visto soggetto ad estrema variabilità, e non considerando l'intero ciclo di vita del prodotto.

Per quanto riguarda il FDM, Balogun et al. (2015) hanno ritenuto la tecnologia "piuttosto efficiente energeticamente", mentre Minetola & Eyers (2018), in un case study sulla produzione di covers per Iphone trovano nella fabbricazione additiva la soluzione più costosa e meno efficiente dal punto di vista ambientale.

Uno studio effettuato da Hettesheimer et al. (2018) riguardante la produzione di componenti per aerei e autoveicoli mediante SLS, che considera sia fase di produzione che di utilizzo, mostra risultati ben diversi, riportati in figura 18.

Nei dati riportati viene considerato anche il risparmio dovuto al cambio di materiale. Cambiando il metodo di produzione, infatti, è consigliato cambiare anche il materiale, per utilizzarne uno pensato appositamente per il processo che si vuole utilizzare. Nel SLS, infatti, le polveri in commercio sono studiate e prodotte per facilitare l'unione delle particelle, minimizzare i difetti del pezzo finito, in modo tale che esso presenti le stesse proprietà del suo corrispettivo creato tradizionalmente, se non addirittura migliori.



	Passenger car	STT	SHA	LHA
Utilisation	1.6	2.3	360.0	480.0
Production process	202.6	202.6	198.3	198.3
Pre-products	9.5	9.5	9.0	9.0

Figura 18: Risparmio di energia annuale per veicolo utilizzando il SLS in fase di produzione e utilizzo. Fonte: Hettesheimer et al. (2018).

Sebbene sia evidenziato un risparmio simile per tutti i settori nella fase di produzione, si nota immediatamente l'impatto dato dalla fase di utilizzo nel settore Aerospace, sia per gli aerei

che percorrono tratte brevi (Short Haul Aircraft – SHA) che per quelli dedicati ai percorsi più lunghi (Long Haul Aircraft – LHA).

Infine, Karimi et al. (2021), in un recentissimo studio, dimostrano che è possibile ottenere un risparmio energetico che arrivi anche intorno al 30%, rispetto alle impostazioni di default date dalla macchina, utilizzando un apposito modello di scheduling della produzione che prenda in considerazione il consumo energetico.

In conclusione, è abbastanza chiaro che non sia possibile, in base ai dati raccolti, dare un giudizio assoluto sulla convenienza dell'AM in termini di consumo energetico, perché i fattori che influenzano questo parametro sono molti e cambiano radicalmente da una situazione all'altra. Tuttavia, a partire dalle evidenze mostrate in questo paragrafo si può affermare che, soprattutto per quanto riguarda i metalli, ci sia un guadagno significativo sia in fase di produzione che in fase di utilizzo del pezzo. Inoltre, è necessario portare all'attenzione del lettore che gli studi esaminati precedentemente si sono limitati alla sola comparazione del consumo energetico legato alle macchine, senza tenere in considerazione il risparmio derivato dalla massiccia riduzione degli sprechi che comporta l'adozione dell'AM per tutta la Value Chain, come evidenziato nei paragrafi precedenti.

Emissioni di CO_2

Le emissioni di CO_2 presentano valori in linea con il fabbisogno energetico. In figura 19 si possono esaminare delle misurazioni effettuate in uno studio di Böckin & Tillman (2019) sulla produzione del motore D5K210 (montato su camion da trasporto), in cui si trovano dati coerenti con quanto affermato nel paragrafo precedente. Lo scenario 0 (S0), rappresenta il riferimento attuale, mentre S1 e S2 sono riferiti all'introduzione dell'AM, con diversi gradi di sviluppo. S2 è lo scenario in cui l'AM è previsto trovarsi tra 10 anni.

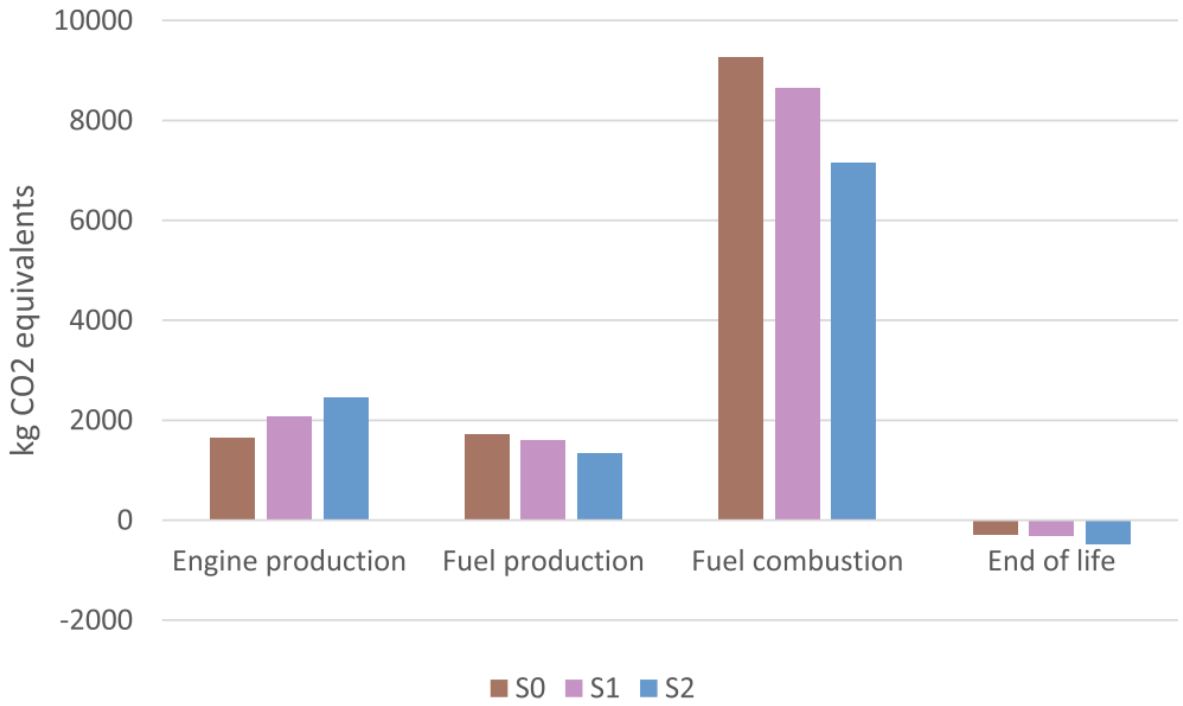


Figura 19: Consumo di CO_2 nelle diverse fasi di vita del motore D5K210, in tre scenari. Fonte: Böckin & Tillman (2019).

Come si può notare, il surplus che si ottiene in fase produttiva viene ampiamente recuperato in fase di utilizzo e di smaltimento.

Questi risultati sono supportati anche da Priarone & Ingarao (2017) che sostengono che, per componenti coinvolti nei trasporti, i benefici ottenuti dal peso ridotto possono superare la riduzione di emissioni in fase produttiva.

Materiale

La fabbricazione additiva porta con sé diversi benefici riguardanti i materiali. Come evidenziato nei capitoli precedenti, innanzitutto, le polveri possono essere pensate e prodotte integrando diversi tipi di materiali, che portano il prodotto finale ad avere caratteristiche e proprietà meccaniche personalizzate per ogni utilizzo. Dal punto di vista ambientale i vantaggi sono principalmente due: il minore utilizzo di materia prima grazie alla libertà di design e l'alta percentuale di riutilizzo.

I processi di AM non pongono vincoli di progettazione. Per questo motivo, i pezzi sono pensati e studiati per essere il più leggeri possibile, in modo tale da essere più performanti. Questo permette di ridurre sensibilmente l'utilizzo del materiale di partenza. Se quindi prima si

producevano un certo numero di pezzi per chilo di materiale, con l'AM se ne possono produrre molti di più.

A sostegno di questo, Priarone et al. (2018) hanno dimostrato che le scelte fatte in sede di design hanno un impatto effettivo sul fabbisogno energetico e quindi sulla riduzione delle emissioni di CO_2.

Anche la riciclabilità del materiale è una caratteristica centrale nell'analisi di una tecnologia, per capire se possa avere le carte in regola per essere adottata su grandissima scala. Si è già visto che, sia per i metalli che per i polimeri, l'AM permette il riutilizzo del materiale in larga parte, soprattutto per i primi.

Per quanto riguarda i polimeri, sono stati effettuati degli studi che promuovono anche soluzioni innovative per il riutilizzo delle resine e delle polveri. Per esempio, Kumar & Czekanski (2018) propongono un metodo per riciclare le polveri polimeriche scartate nei processi di SLS per produrre filamenti da impiegare nel FDM. Le proprietà del materiale ottenuto sono buone e affidabili, e si dimostrano assolutamente adatte all'uso nell'FDM.

Nur-A-Tomal et al. (2020), invece, hanno sperimentato il riciclaggio di oggetti in plastica, nello specifico giocattoli, per la creazione di materiale polimerico di partenza per processi di fabbricazione additiva.

Conclusione

Dalla letteratura scientifica esaminata, non sussistono dubbi nell'affermare di benefici dell'AM in termini di riduzione degli sprechi. Se questa tecnologia verrà adottata su scala maggiore, questa riduzione potrà essere tangibile e importante per l'industria manifatturiera. Tuttavia, si ribadisce che sarà necessaria un'ulteriore evoluzione della tecnologia e un abbassamento delle barriere socioculturali che attualmente pongono ancora una resistenza sensibile al cambiamento.

4. Legami tra AM e filosofia Agile

In questo capitolo si andrà a trattare il profondo legame tra AM e Agile management. Quando si pensa all'AM, infatti, non si può che associarlo alla filosofia Agile, date le caratteristiche intrinseche della tecnologia, che concedono grandissima libertà e flessibilità sia dal punto di vista prettamente produttivo sia da quello riguardante le catene del valore. Prima di concludere il capitolo si tratterà nello specifico del mercato della fabbricazione additiva di pezzi di ricambio, su cui sono stati effettuati molti studi e in cui molte aziende sono già attive.

La "Mass Customization decade"

Il concetto di Mass Customization, emerso con forza negli ultimi dieci anni, si basa sul fornire prodotti e servizi personalizzati, basandosi su design modulari, processi flessibili e integrazione dei membri delle supply chain (Fogliatto et al., 2012).

Dal lato dei produttori, offrire dei prodotti più specifici per ogni cliente porta ad alzare i prezzi, attuare strategie di Postponement e quindi avere un accesso maggiore alle esigenze del mercato, e ad aumentare la fidelizzazione del cliente.

Il consumatore, invece, può differenziarsi dalla massa e sentire di esprimersi meglio, avendo la possibilità di essere "unico".

In questo clima, si rende necessaria la coesistenza, o l'integrazione, di due visioni che fino a qualche tempo fa erano considerate in antitesi: la produzione in serie e la customizzazione. Prima, infatti, si tendeva a pensare che i prodotti personalizzati potessero essere realizzati in piccoli lotti, ad un prezzo anche molto più alto, ed in effetti era così. Tuttavia, in questo momento storico, l'avvento di nuove tecnologie come l'AM potrebbe aprire le porte alla Mass Customization, permettendo la produzione in grandi quantità di pezzi diversi tra loro, ognuno pensato per le specifiche esigenze del consumatore. Tutto ciò grazie ai vantaggi della tecnologia, di cui si è trattato in precedenza.

Inoltre, diventa sempre più fondamentale poter essere in grado di rispondere alle esigenze del mercato nel minor tempo possibile, accorciando i lead times, rimandando le operazioni di customizzazione a quando si hanno informazioni sulla domanda (e quindi anche passando da

MTS a MTO) e, dove possibile, delocalizzando la produzione. Quelli citati nell'ultima frase non sono altro che i principi portanti della filosofia Agile.

Nei prossimi paragrafi si esploreranno nello specifico gli aspetti dell'AM che contribuiscono in maniera decisiva a rendere più agili le operazioni di un'azienda.

Flessibilità

Non esiste una vera definizione, standardizzata e approvata da tutti, del concetto di flessibilità. Esso può assumere diversi significati a seconda delle applicazioni e dei diversi casi che si vanno ad analizzare. La letteratura scientifica in merito all'AM riconosce la tecnologia come in grado di facilitare il raggiungimento della flessibilità in ambito Operations, ma pochi studi si concentrano sul significato e sulle sfumature del concetto in questi contesti (D. R. Eyers et al., 2018).

Nello specifico dell'AM, Eyers et al. (2018) elencano sette tipi di flessibilità tipici dell'AM, che vengono ribaditi anche successivamente (D. Eyers, 2020):

- **Flessibilità per la produzione MTO:** La possibilità, dati i tempi ridotti, di produrre in risposta ai singoli ordini dei clienti;
- **Flessibilità nel design:** nei capitoli precedenti si è visto come la libertà offerta dall'AM conferisca un'infinità di possibilità in fase di design;
- **Flessibilità nel produrre un ampio ventaglio di pezzi:** oltre al poter pensare una quantità variegata di soluzioni in fase di sviluppo, l'AM è anche in grado di produrle senza perdite di tempo per set-up o cambi utensile**;**
- **Flessibilità nel produrre un ampio ventaglio di geometrie:** Alla facilità nel design e nella produzione di pezzi diversi tra loro, segue anche la semplicità nella realizzazione di pezzi con geometrie complesse, che comportano vantaggi considerevoli sotto molti punti di vista (cfr. cap. 3);
- **Flessibilità nell'uso di diversi materiali:** Le polveri e le resine possono essere realizzati con un mix di materiali grazie al quale si ottengono specifiche proprietà finali, ma non solo: le singole macchine possono anche essere in grado di utilizzare diversi materiali per la costruzione di diverse zone del pezzo;

- **Flessibilità nel poter fabbricare i prodotti senza bisogno di utensili:** nell'AM, infatti, il pezzo è costruito direttamente a partire dal modello CAD;
- **Flessibilità nello sfruttare le variabili coinvolte a proprio vantaggio:** i parametri di costruzione, come discusso precedentemente, sono impostabili e in base alla loro configurazione il risultato finale cambia: questo può essere sfruttato per ottenere specifiche proprietà nel pezzo che si produce.

Insieme a queste sette declinazioni, Eyers (2020) ne aggiunge altre cinque "emergenti":

- **Flessibilità nella riorganizzazione delle schedulazioni:** potendo cambiare i piani di produzione senza subire conseguenze;
- **Flessibilità nel variare il volume di produzione**;
- **Flessibilità nel migliorare la resilienza del sistema:** permettendo di rispondere meglio a guasti e interruzioni;
- **Flessibilità nel produrre in maniera autonoma:** gli interventi umani richiesti sono minimi se non nulli per certe linee di produzione;
- **Flessibilità data da un flusso di informazioni senza impedimenti**.

Mentre le prime sette si concentrano più sulle macchine, le seconde riguardano i processi. Concentrandosi solo sulle macchine, infatti, si rischia di non cogliere tutti gli aspetti che rendono l'AM una soluzione vantaggiosa per raggiungere l'agilità.

DfAM

Si è già trattato il concetto di Design for Additive Manufacturing, che permette la creazione di pezzi che sfruttino appieno le capacità della tecnologia, raggiungendo performance ottime in fase di utilizzo. Tuttavia, esistono altre potenzialità che non vengono sfruttate appieno, come per esempio il poter produrre direttamente dal modello CAD senza l'uso di un utensile (Reichwein et al., 2020). In fase di prototipazione, infatti, questa capacità permette di produrre prototipi a intervalli regolari, integrando la procedura nei processi di sviluppo del nuovo prodotto. In questo modo si possono raccogliere informazioni fondamentali dai prototipi generati, di qualità peraltro simile se non pari al prodotto finale, e apportare cambiamenti in corsa senza tardare sulla tabella di marcia. Capita spesso, infatti, che, anche

nelle fasi finali dello sviluppo, il cliente faccia delle richieste di cambiamento che diventano difficili da applicare senza causare ritardi nei processi tradizionali.

Delocalizzazione

Si è già parlato di come la centralizzazione della produzione per l'AM non comporti un reale beneficio in termini di economie di scala.

T. C. T. Chen & Lin (2019) propongono un metodo di produzione delocalizzato su più siti produttivi, partendo dalle seguenti considerazioni:

- È vero che per produrre un singolo prodotto l'AM è più costoso rispetto alla produzione di massa, tuttavia con un solo sistema possono essere fabbricati più prodotti, mentre nella produzione di massa si avrebbe bisogno di sistemi dedicati a ciascuno;
- Anche se i tempi di costruzione sono più lunghi nell'AM, è più facile trovare strutture da dedicarle che siano più vicini al cliente rispetto alla manifattura tradizionale. La differenza risultante nei tempi di trasporto compensa i tempi più lunghi.
- Se si impiegano le tecniche tradizionali, la produzione è pianificata in anticipo. Avere una struttura dedicata alla fabbricazione additiva con ulteriore capacità disponibile rende più fluida e flessibile tutta la catena, molto più che una linea di produzione tradizionale parallela a quelle già esistenti.

Il sistema che illustrano prevede che un cliente effettui un ordine online tramite un catalogo dedicato. Successivamente, un'unità centrale lo registra e identifica le strutture disponibili più vicine avvalendosi della rilevazione della posizione di chi ha fatto l'ordine, e distribuisce la produzione su più di una struttura. I pezzi vengono stampati, raccolti da un camion di società terza e consegnati al cliente.

Figura 20: Esempio di distribuzione dei siti di produzione. Fonte: T. C. T. Chen & Lin (2019).

La funzionalità del metodo è stata testata tramite varie simulazioni ed è risultato efficace nel distribuire gli ordini sui vari siti senza sovraccaricarne uno lasciandone liberi altri.

Questo esempio dimostra come l'uso dell'AM permetta alle aziende di poter modellare le proprie catene del valore in maniera estremamente varia senza subire penalizzazioni in termini di costi e tempi di consegna. Le supply chain del futuro andranno ripensate uscendo dagli schemi tradizionali per ottenere gli effetti migliori.

Pezzi di ricambio

Uno dei settori che vede la presenza maggiore dell'AM è senza dubbio quello dei pezzi di ricambio, in cui mostra al meglio le peculiarità che lo rendono Agile.

Molte industrie hanno bisogno di pezzi di ricambio per componenti in regioni non sempre velocemente accessibili, e questo comporta problemi dal punto di vista logistico, creando veri

e propri colli di bottiglia nella supply chain. Inoltre, in molti casi il pezzo da sostituire è stato usato per molto tempo, perciò il suo ricambio potrebbe non essere più in stock e non essere più prodotto, e la documentazione tecnica smarrita (Joaquin et al., 2019).

L'interesse per l'AM in questo ambito è molto cresciuto, grazie ai vantaggi che può offrire in queste situazioni difficili.

Solitamente, in mancanza di dati affidabili, il pezzo deve essere digitalizzato. Per fare ciò, esso viene prima di tutto scansionato. In seguito, con l'aiuto del software di eliminano gli eventuali errori di scansione, e si modificano delle aree a seconda delle volontà del designer. Successivamente, nella fase più complicata, si adattano le caratteristiche del pezzo alla produzione in AM, per sfruttare i vantaggi del DfAM. In questa fase bisogna avere una conoscenza approfondita del pezzo e delle sollecitazioni coinvolte durante il suo utilizzo, perché si decide quali proprietà esaltare e su quali invece non concentrarsi approfonditamente. Dopo la produzione del file CAD, si verifica tramite simulazioni la buona resa del pezzo e viene generato il file STL che sarà mandato in produzione.

Si producono poi una serie di prototipi in scala ridotta per avere una prova visiva e chiarire i punti incerti prima della produzione. In questa fase, il designer può apportare delle modifiche se il risultato non lo soddisfa.

Una volta completata la virtualizzazione, il pezzo può essere prodotto in AM. Ne vengono testate le dimensioni e le proprietà meccaniche, e viene sottoposto a dei test pratici che, se superati, decretano la fine del processo di sviluppo. La produzione effettiva può avvenire direttamente nel sito di utilizzo, permettendo di evitare i costi e i tempi di trasporto.

Montero et al. (2019) propongono di sfruttare questi vantaggi inserendo diversi team dedicati con differenti livelli di abilità e di conoscenza della tecnologia, con i più esperti concentrati nella fase di sviluppo e i meno esperti nella produzione sul sito, affiancati da uno specialista. I pezzi ottenuti sono risultati di ottima qualità.

Khajavi et al. (2014) prevedevano già che, con gli sviluppi della tecnologia, il modo migliore per organizzare la supply chain era lo scenario distribuito. Al momento consideravano ancora quello centralizzato più adatto per lo stato della tecnologia, a causa del forte bisogno di

personale umano, ma con il progressivo miglioramento e l'introduzione di un grado di automazione sempre più forte, il modello distribuito diventa quello più efficace. Inoltre, specificano che il tasso di utilizzo delle macchine nel modello centralizzato si attesta intorno al 95%, mentre per quello distribuito si rimane al 25%. Questo concede al sistema moltissima flessibilità e capacità di assorbire con facilità i picchi nella domanda.

Anche P. Liu et al. (2014) studiano gli impatti dell'introduzione dell'AM nella supply chain dei pezzi di ricambio, prendendo in esame l'industria aerospaziale. In particolare, si concentrano sul monitoraggio degli stock di sicurezza in tre scenari: Standard, AM distribuito e AM centralizzato. Vengono presi in esame sei pezzi, e monitorati i livelli di stock di sicurezza all'aumentare della deviazione standard nella domanda.

Per tutti gli scenari, lo stock di sicurezza aumenta all'aumentare della variabilità, come facilmente prevedibile. Quando la variabilità resta bassa, lo scenario distribuito è quello che richiede il minor livello di stock, per ogni pezzo esaminato. Quado la deviazione standard aumenta oltre il 30% della domanda, per due pezzi su sei risulta migliore lo scenario centralizzato. Si tratta di pezzi con domanda molto bassa e variabilità molto alta, che quindi probabilmente non potrebbero beneficiare appieno del modello distribuito.

In generale, in ogni scenario e per ogni valore esaminato, i modelli AM richiedono un livello di stock di sicurezza decisamente minore di quello dei modelli standard.

Per quanto riguarda costi ed emissioni, Li et al. (2017) affermano che le supply chain convenzionali devono sostenere costi di trasporto maggiori dovuti alla maggior complessità (più anelli nella catena) e più alte probabilità di shortage. Stock di sicurezza più alti, inoltre, comportano costi maggiori. Tuttavia, esaminando i costi totali, i modelli standard potrebbero nel complesso risultare i meno costosi, ma con lo sviluppo della tecnologia AM questo vantaggio si perderà, dato che si è visto un ribasso graduale dei prezzi nel settore dovuto allo sviluppo del mercato, che non tenderà di certo a diminuire nei prossimi anni.

Considerando le emissioni, nello studio si conferma ciò che si è detto nel capitolo precedente, ovvero che l'AM risulta produrre più emissioni durante la fase di produzione ma, nella totalità della supply chain, è il più conveniente. Per ogni scenario, la fase più inquinante è quella della produzione delle materie prime, come si può vedere in tabella.

Sources of carbon emission	Conventional supply chain		Centralised supply chain with the adoption of AM		Decentralised supply chain with the adoption of AM	
Raw materials production	956,961.00	87.82%	166,254.12	59.17%	166,079.50	63.46%
Raw materials powder production	–	–	12,711.87	4.52%	12,698.52	4.85%
Manufacturing	14,711.49	1.35%	63,920.64	22.75%	63,920.64	24.42%
Material transportation	60,940.80	5.59%	19,044.00	6.78%	19,024.00	7.27%
Products transportation	57,117.00	5.24%	19,024.00	6.77%	–	–
Total	1,089,730.29	100%	280,954.63	100%	261,722.68	100%

Figura 21: Tabella riassuntiva delle emissioni nelle varie fasi della supply chain per i tre scenari esaminati. Fonte: Li et al. (2017).

Il modello distribuito è il meno inquinante perché la catena è logisticamente più efficiente. Meno livelli risultano, infatti, in minori trasporti e quindi anche in emissioni ridotte.

Un'altra problematica da trattare è sicuramente quella legale, correlata alle proprietà intellettuali dei file CAD. Il mercato digitale, infatti, sta crescendo e necessita di monitoraggio e regolamentazione. Molti file di componenti prodotti tramite AM stanno diventando pubblici, e Boeing ha brevettato un sistema che permetterà di produrre pezzi di ricambio di un veicolo aereo, avvalendosi di una libreria pubblica e un database di informazioni tecniche (Ballardini et al., 2018). In Europa, ci sono ancora delle zone grigie nella legislazione per quanto riguarda i concetti di "costruire" e "riparare". È proibito, infatti, costruire da zero un prodotto brevettato ma una terza parte può ripararlo. Il problema sorge quando, per ripararlo, è necessario costruire da zero un pezzo di ricambio. In questo senso la legge non è unificata e dà origine a dispute.

Con lo sviluppo ulteriore del settore, quindi, sarà necessario introdurre una regolamentazione chiara in modo tale da non creare disguidi e favorire la crescita del mercato.

Integrazione tra AM e tecniche tradizionali

Alcuni studiosi si sono concentrati sul pensare dei sistemi in cui AM e manifattura tradizionale convivano e l'una tragga benefici dall'altra. Non è plausibile, infatti, per lo meno nel breve e nel medio termine, che l'AM sostituisca in toto le altre tecniche, ma piuttosto che vada ad integrarsi a loro in modo da creare un sistema unico più efficiente, che sfrutti i benefici di tutte le tecnologie disponibili sul mercato.

Sasson & Johnson (2016) fanno l'esempio della "coda lunga". Solitamente, infatti, i prodotti disponibili sono solo una porzione del totale di quelli che potrebbero essere offerti. Quelli che possono raggiungere un certo quantitativo di vendite sono messi in produzione, gli altri invece sono prodotti solo in piccole serie, come prototipi utilizzabili o lotti personalizzati. Lo studio propone un modello in cui i prodotti della coda lunga vengono fabbricati in AM, riducendo costi e lead time.

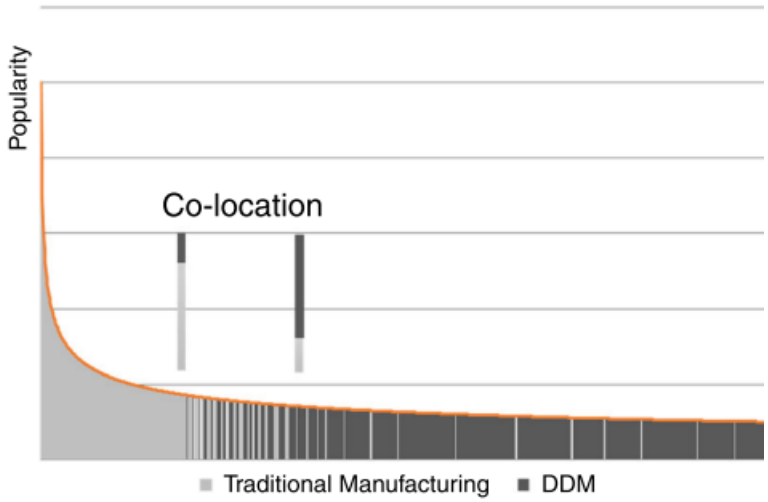


Figura 22: Esempio del modello a coda lunga. Fonte: Sasson & Johnson (2016).

Schuh et al. (2018), invece, esaminano la possibilità di usare l'AM per produrre utensili da utilizzare nei processi tradizionali, nel contesto dello sviluppo dell'industria 4.0.

In particolare, promuovono l'utilizzo dell'AM per le seguenti operazioni:

- **Prototipazione**: l'AM nasce come tecnologia di prototipazione rapida e quindi non si possono non sfruttare i vantaggi offerti in questo campo. Con le tecnologie di oggi, poi, i prototipi sono molto fedeli al prodotto finale, e grazie alla velocità di fabbricazione se ne possono produrre di più cambiando alcuni dettagli in corsa.
- **Fabbricazione di teste portautensili e parti attive per prototipi di utensili**: in questo modo queste parti possono essere prodotte velocemente, accorciando la fase di sviluppo.
- **Fabbricazione di utensili in serie**: l'AM può essere impiegato anche per la produzione in serie di utensili, riducendo i lead times e beneficiando della vasta scelta di materiali.

Adottare l'AM porterebbe le aziende che producono utensili ad affrontare meglio le forti pressioni che subiscono dal mercato, che diventeranno sempre più intense. In questo modo, esse potranno rafforzare la loro posizione sul mercato ed aumentare la competitività, riducendo costi e tempi di sviluppo e produzione dei pezzi.

Conclusione

In questo capitolo si sono esaminate le potenzialità dell'AM in ambito Agile. Questa tecnologia ha la possibilità di cambiare completamente il modo in cui le supply chain sono pensate, permettendo alle aziende di essere più vicine al cliente sia in termini di design e customizzazione, offrendo un prodotto sempre in linea con le esigenze del singolo, sia dal punto di vista logistico, riducendo sensibilmente i trasporti grazie alla delocalizzazione delle strutture produttive.

Le caratteristiche Agile vanno anche ad impattare la fase di sviluppo e prototipazione, rendendola più veloce e dinamica. Molti cambiamenti possono essere apportati in corsa senza subire grossi ritardi, risultando in un prodotto di qualità complessiva superiore.

In conclusione, allo stato attuale l'agilità dell'AM può essere sfruttata al meglio nel settore dei pezzi di ricambio, in cui la domanda è incerta e distribuita, e a supporto della manifattura tradizionale per i prodotti meno richiesti, grazie alla possibilità di produrre pezzi di qualità in poco tempo e assorbire le fluttuazioni nella domanda con uno stock di sicurezza ridotto.

5. Presente e futuro dell'AM nella produzione e per le supply chains

In questo capitolo verranno discussi il presente ed il futuro della tecnologia, con particolare focus sul come verrà implementata nelle catene produttive, come cambieranno effettivamente le supply chain del futuro e come si evolverà la tecnologia nel medio e lungo termine.

Integrazione dell'AM nei processi odierni

Nel 2015, Achillas et al. affermavano che l'AM fosse adatto per piccoli volumi, per il passaggio ad una strategia MTO e un efficientamento della supply chain per le piccole serie, grazie all'abbattimento dei costi di produzione e alla spinta Agile offerta dalla tecnologia.

Ilg et al. (2019) introducono persino un modello di valutazione della convenienza nell'adottare l'AM per la realizzazione di una o più linee di prodotto per le piccole e medie imprese. Si parte dalla verifica della compatibilità del prodotto con la fabbricazione additiva, passando poi alla scelta dei materiali e del processo più adatti, alla prototipazione e analisi qualitativa, terminando con un'analisi della produzione e della convenienza dell'operazione. Questo metodo aiuta le aziende che hanno poca competenza in materia di AM a seguire un percorso strutturato.

In questo periodo storico di prematurità della tecnologia, sono sempre di più gli studi che mirano ad una standardizzazione dei processi, per favorirne lo sviluppo. Non si può lasciare, infatti, che ogni azienda operi secondo le proprie regole, perché in quel caso verrebbe a mancare un terreno comune di sviluppo e ne risentirebbe anche la comunicazione. È molto più semplice lavorare con un fornitore, o con un partner, che conosca già i processi. Se si è tutti sulla stessa pagina, il rischio che ci siano errori di comunicazione si abbassa, la cooperazione è migliore e l'utilizzo della tecnologia è incentivato.

Oggi, però, l'AM si dimostra in grado di sostenere produzioni anche di alto volume, e più si andrà verso la maturità della tecnologia, più diventeranno i pezzi prodotti in serie tramite AM.

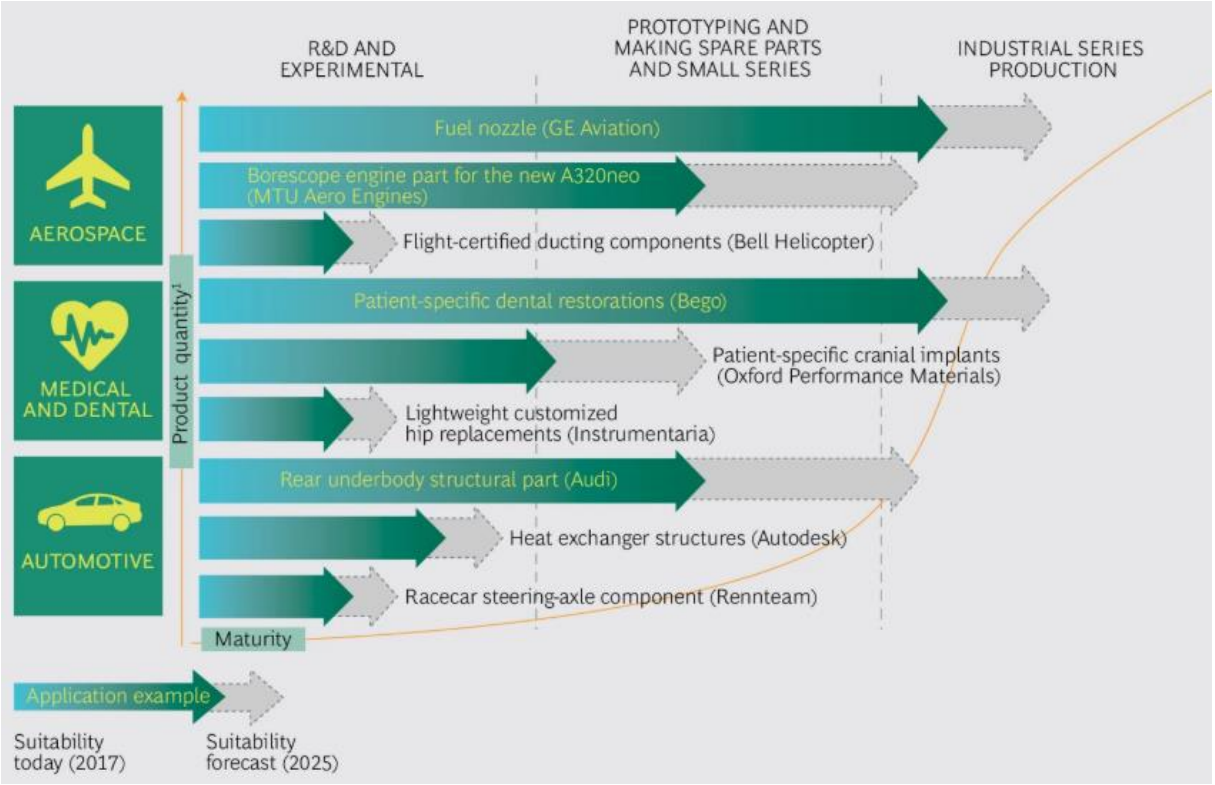


Figura 23: Possibile sviluppo dei volumi di produzione in AM fino al 2025. Fonte: Boston Consulting Group (2017).

In quest'immagine viene raffigurata una previsione del Boston Consulting Group (2017), in cui viene proiettato lo sviluppo dell'AM al 2025. Si nota come già allo stato attuale l'AM venga impiegato per produzioni in serie da General Electric per produrre una parte di un suo motore per un aeroplano, e anche nel settore dentale per la realizzazione di protesi. Nel settore Aerospace, inoltre, uno studio di Brom et al. (2017) effettuato sulla produzione di massa di un aereo senza pilota per le brevi tratte ha confrontato tempi e costi di fabbricazione tramite tecniche tradizionali e additive. I risultati sono riassunti in tabella.

	Traditional manufacturing technology	Additive manufacturing technology	Effectiveness of implementation
$T_{batch\ production}$	1044 days	392 days	2,7
$T_{prototype\ production}$	22 days	2 days	10
$T_{one\ UAV}$	10 days	2 days	5
$C_{batch\ production}$	8472032	4925000	1,7
$C_{propotype\ production}$	185416	140000	1,3
$C_{one\ UAV}$	81186	47850	1,7

Figura 24: Differenze di tempi e costi per la produzione di velivoli in AM e tradizionale. Fonte: Brom et al., 2017.

Balza subito agli occhi il tempo di prototipazione ridotto di dieci volte, insieme a quello di produzione effettivo del UAV (Unmanned Aerial Vehicle - il velivolo in questione) ridotto di cinque. Anche i costi risultano essere più bassi di un fattore medio che si aggira intorno al 1,5.

Nel 2025, anche il settore Automotive potrebbe vedere la produzione in grandi volumi attraverso l'AM di parti strutturali dei modelli AUDI. BMW, invece, ha già utilizzato l'AM per produrre più di 10000 pezzi per la Rolls-Royce Phantom, riducendo i costi per lo sviluppo dei componenti. In generale, però, per quanto riguarda l'Automotive è più plausibile che l'AM resti una nicchia legata alla produzione di componenti per motori ad alto livello di performance, anche se le case tedesche stanno investendo molto su di esso.

Infatti, sono ancora molte le barriere che impediscono una larga diffusione dell'AM. Un'analisi svolta da Rohde et al. (2019) identificano queste barriere e le pongono su cinque livelli, basandosi per ognuna sul grado di influenza e di interdipendenza dalle altre. Le barriere del primo livello dipendono da altre, ma non ne generano altre a loro volta. Più si sale di livello –

o si scende nello schema in figura – e più le barriere identificato sono ritenute influenti e generatrici di ulteriori barriere.

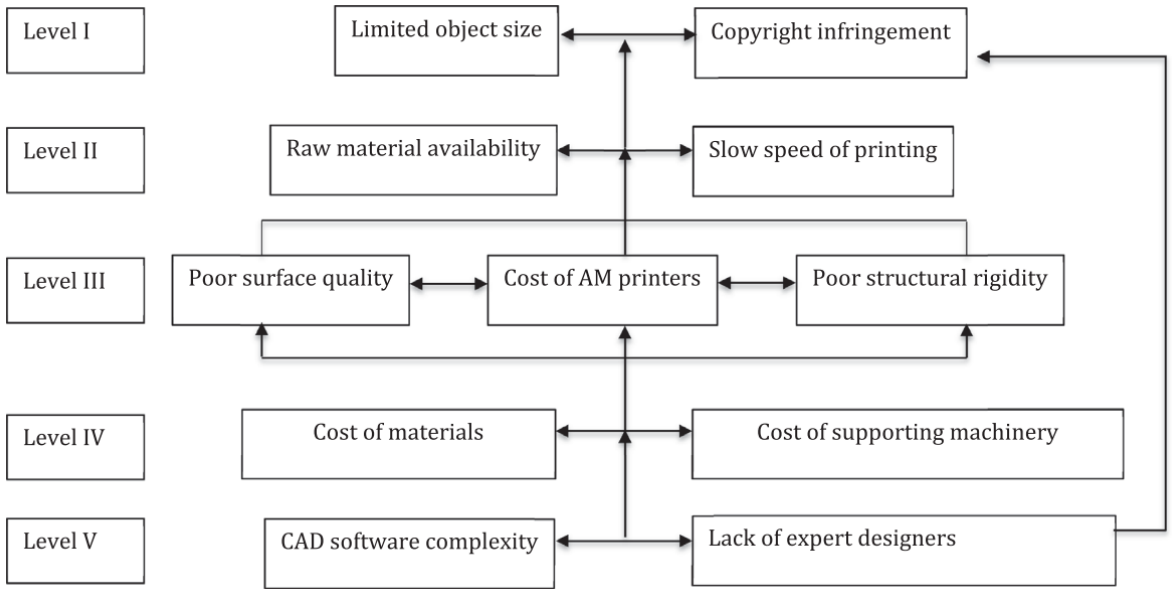


Figura 25: Rappresentazione delle barriere e della loro interdipendenza. Fonte: Rohde et al., (2019).

Le barriere autonome, come la paura di infrangere il diritto d'autore, hanno minima influenza sulle altre ma una grande influenza sul mercato. Ci sono tre barriere fortemente dipendenti, come la grandezza limitata degli oggetti, la velocità di stampa contenuta, e la disponibilità di materie prime. Queste barriere sarebbero molto difficili da eliminare direttamente, perché sono strettamente dipendenti da altre.

Le barriere poste al livello III, invece, sono molto importanti perché non solo influenzano quelle dei livelli I e II, ma sono anche fortemente influenzate da quelle dei livelli superiori e tra di loro. Il costo elevato dei sistemi di stampa è dovuto al costo dei materiali e dei macchinari di supporto, quindi per abbattere questa barriera sarebbe necessario intervenire su quest'ultime. Tuttavia, non sarebbe sufficiente, perché ci sarebbero ancora quelle di livello V che eserciterebbero la loro influenza. D'altra parte, il costo dei sistemi di stampa è strettamente legato alla qualità della superficie e della struttura dei prodotti, perché per ottenere ottime proprietà bisogna comprare i macchinari più costosi.

Per abbattere le barriere identificate, quindi, sarà necessario intervenire prima su quelle che si trovano alla base del castello, per creare una sorta di effetto a catena che porterà

all'eliminazione delle altre dipendenti da esse. Le barriere di livello IV e V saranno abbattute con l'espansione del mercato, l'introduzione di software meno costosi e la comparsa di figure professionali formate appositamente per lavorare con l'AM. I costi delle materie prime e dei macchinari, inoltre, si stanno già abbassando grazie all'introduzione nel mercato di nuovi players che apportano innovazioni e alzano il livello di competizione, causando un abbassamento generale dei prezzi che sarà sempre più sostenuto nei prossimi anni (Wohlers Associates Inc., 2017).

Soluzioni ibride

Si fanno sempre più strada negli ultimi anni le proposte di nuovi metodi per ibridare la tecnologia AM con quelle esistenti. In questo paragrafo si presenteranno tre studi che si concentrano su ambiti e momenti diversi dei cicli produttivi ma che hanno come concetto comune quello di armonizzare l'AM con i processi esistenti, in modo non solo da ottenere risultati migliori, ma anche da favorire l'ingresso della tecnologia nelle catene di produzione attuali.

Wasley et al. (2016) presentano una soluzione ibrida per la produzione di pezzi con parti elettroniche incorporate, avvalendosi della stereolitografia. Si utilizza un processo bottom up, che produce pezzi con alta qualità superficiale, dando la possibilità di aggiungere i circuiti e incapsularli tra gli strati.

Gli studiosi hanno anche realizzato dei prototipi di questo tipo di prodotti per dimostrare l'efficacia del metodo.

A livello produttivo, invece, suscita particolare interesse la cella di produzione ibrida proposta da Stavropoulos et al. (2018). Essi hanno studiato una stazione produttiva composta da diverse braccia robotiche a cui vengono montati sistemi laser per effettuare DED e sistemi sottrattivi, in modo da poter costruire e finire il pezzo su un solo piano di lavoro e senza tempi morti. Questa struttura permetterebbe di costruire pezzi di varia grandezza, aggiungendo o rimuovendo teste operanti all'aumentare o al diminuire delle dimensioni del pezzo da produrre. Inoltre, le operazioni di AM e SM potrebbero essere svolte contemporaneamente in zone diverse del pezzo. Per quanto riguarda i problemi legati alla precisione, le compensazioni vengono gestite in due modi: offline e online. Il primo prevede gli errori del

sistema e li tiene in considerazione prima del movimento, mentre il secondo si occupa di misurare lo spostamento che il braccio sta effettuando e di rilevare eventuali errori.

Un esempio di questa soluzione è mostrato in figura.

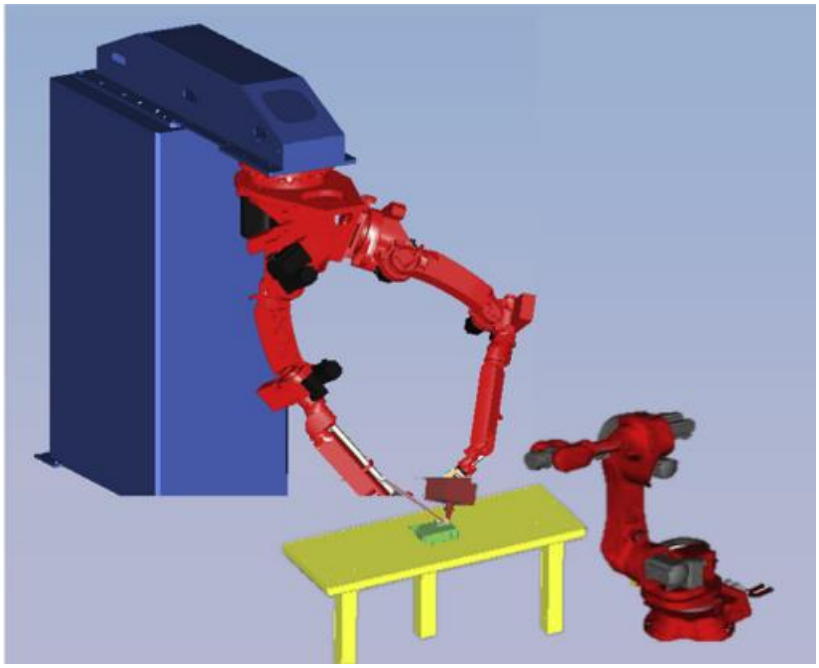


Figura 26: Raffigurazione della cella di produzione ibrida gestita da bracci robotici. Fonte: Stavropoulos et al. (2018).

Il terzo esempio, invece, riguarda la costruzione di hub di servizi dedicate alla fabbricazione additiva che lavorino in parallelo alle strutture preesistenti e che offrano la propria capacità produttiva ai clienti, che potranno sfruttarla per la produzione di pezzi in metallo geometricamente complessi (Strong et al., 2018). In particolare, l'obiettivo dei ricercatori è quello di trovare i siti geografici più adatti per la collocazione di questi hub.

Lo studio si basa sulle idee di cui si è trattato nel capitolo precedente riguardo alla delocalizzazione delle strutture e vuole proporre una soluzione per sfruttare questi vantaggi, in sinergia, però, con le tecniche attuali. L'approccio proposto mira a favorire la diffusione dell'AM, introducendolo come supporto per la realizzazione di pezzi in metallo geometricamente complicati. In questo modo, i produttori tradizionali potrebbero avere un accesso alla tecnologia per imparare a conoscerla senza doverla adottare da subito in

sostituzione ai propri sistemi. Inoltre, non sempre i produttori tradizionali necessitano di pezzi metallici geometricamente complicati.

In questo modo, per molte imprese non sarà necessario investire direttamente in macchine dedicate alla fabbricazione additiva, e con esse la formazione dei tecnici, la manutenzione e la ricerca.

L'AM e le supply chain del futuro

Al giorno d'oggi, le catene di approvvigionamento mondiali sono in costante cambiamento. I problemi di oggi, infatti, non sono uguali a quelli di ieri e necessitano di soluzioni sempre diverse e innovative.

Si può dire che le aziende proseguano in un ciclo di miglioramento continuo, che passa dallo stabilire una strategia, all'organizzare una struttura produttiva e distributiva e infine all'implementazione di nuove tecniche operative, come parte di un continuo processo di valutazione e risoluzione di problemi che non smettono mai di presentarsi (Rogers et al., 2017). L'AM potrebbe fare parte di questo ciclo, aiutando le imprese apportando dei vantaggi rispetto alle tecnologie impiegate attualmente.

Con l'introduzione della fabbricazione additiva, le attuali configurazioni delle supply chain cambieranno, e allo stesso modo cambieranno i modelli di business a loro associati. L'AM permetterà la produzione in minore quantità senza costi al pezzo insostenibili, e diversificare l'offerta sarà più facile. Il numero di fornitori potrà ridursi di molto, visto che, in uno scenario estremo, l'unico fornitore di cui si ha bisogno è quello dei materiali di partenza (Chan et al., 2018). Inoltre, dato l'alto grado di automazione, la presenza umana in linea può diminuire, e con essa i costi associati. In particolare, come si è visto anche nei capitoli precedenti, l'AM già oggi garantisce tempi e costi di sviluppo molto più contenuti, grazie all'eliminazione dello stampo per la produzione di prototipi.

"Questa tecnologia ha il potenziale per raggiungere un approccio diverso al modo in cui fabbrichiamo i componenti critici. In questo modo, possono essere prodotti oggetti leggeri con geometrie uniche che sono in grado di ridurre lo spreco di materiale e il consumo di energia" (Varsha Shree et al., 2020).

Bogers et al. (2016) riprendono i concetti di delocalizzazione espressi nei capitoli precedenti e parlano di supply chain "glocalizzate" (crasi tra globale e locale). Questo modello ha come obiettivo la creazione di una struttura locale ma su scala globale, composta da molte unità locali autosufficienti ma presenti in tutto il mondo e che seguono gli stessi principi. L'aspetto locale è evidenziato dal fatto che ogni stabilimento deve rifornirsi da fornitori locali, mentre la struttura globale sta nell'applicare questa struttura in tutti i siti produttivi. L'AM, grazie alle sue caratteristiche, si sposa molto bene con questa filosofia. Portando questo concetto all'estremo, si potrebbe immaginare un'azienda che produce direttamente nei propri store, permettendo al consumatore di conoscere meglio la tecnologia e offrendo una customer experience diversa e accattivante. In più, si ridurrebbero i livelli di inventario e si produrrebbe in base alla domanda reale, tuttavia è molto probabile che questo tipo di scenario resti ipotetico ancora per molto tempo. Si può però affermare che, tra i benefici diretti dell'AM, c'è l'opportunità di rendere disponibili pezzi in posti in cui non si potrebbe arrivare facilmente alle condizioni attuali (Holmström & Partanen, 2014).

Inoltre, l'AM gioca un ruolo fondamentale per il Postponement nelle supply chain, dando l'opportunità a molti fornitori di produrre in fasi del processo più vicine alla consegna, senza doverlo fare prima in base alle premesse dei loro fornitori. Il risultato è una riduzione dello stock lungo la supply chain. Vengono ridotti anche l'obsolescenza e gli esaurimenti delle scorte (Holmström & Partanen, 2014).

Un altro aspetto molto importante da tenere in considerazione è la digitalizzazione della produzione. Con una base di modelli digitali e informazioni raccolte in continuazione, si può creare una struttura digitale ampia e organizzata, in cui i processi sono standardizzati ma i prodotti e i servizi sempre più personalizzati.

Quattro principi generali per descrivere l'AM nell'ambito delle strategie per la supply chain

Nyman & Sarlin (2014) analizzano nel dettaglio tutte le caratteristiche dell'AM ed enunciano quattro principi fondamentali che possano descrivere le caratteristiche dell'AM in ambito strategico per quanto riguarda la supply chain. Questi quattro principi sono:

- Green operations;
- Flessibilità a basso costo per la postposizione del Decoupling Point;

- Mancanza di economie di scala;
- Ridefinizione del come, del dove e del chi;

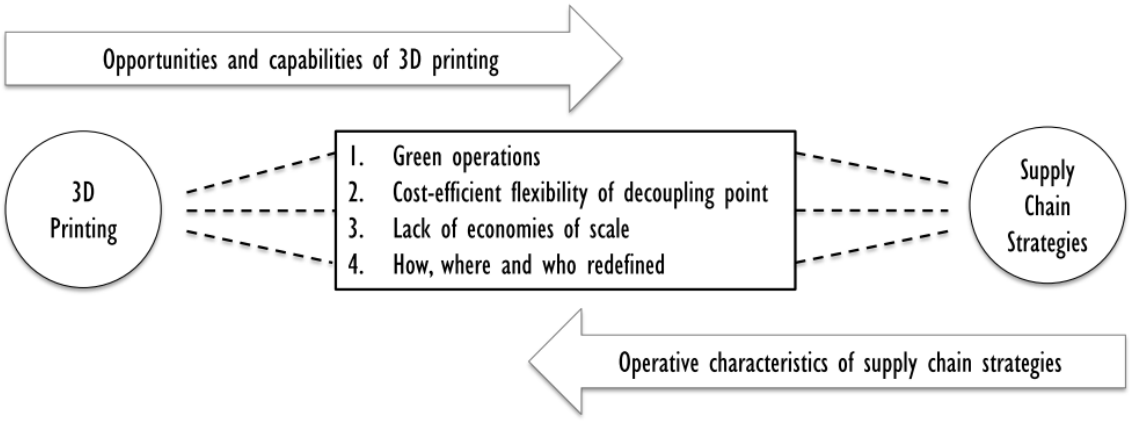


Figura 27: I quattro princìpi che legano l'AM alle strategie per la supply chain. Fonte: Nyman & Sarlin (2014).

Come si è detto nel capitolo 3, gli aspetti Lean rendono le operazioni più sostenibili. Tutto ciò che non viene sprecato contribuisce all'abbassamento delle emissioni di gas serra.

Il secondo punto è relativo al concetto di supply chain distribuita. La flessibilità dell'AM permette di arrivare più vicino al cliente e quindi di posizionare il DP più verso il mercato.

La mancanza di economie di scala è data dal fatto che, anche per caratteristiche intrinseche della tecnologia, il costo unitario rimane pressoché inalterato all'aumentare dei volumi prodotti. Nella produzione tradizionale, invece, è possibile raggiungere economie di scala perché i costi fissi sono abbattuti raggiungendo un determinato volume di produzione. Questo da una parte impedisce l'impiego dell'AM per grandi produzioni in serie, ma dall'altra ne permette l'utilizzo per fabbricare minori quantità in molti posti senza dover centralizzare la produzione, e permette a player più piccoli di offrire prodotti customizzati ad alto valore aggiunto.

In futuro, il modo in cui si produce cambierà, e con esso anche le skills richieste a chi si occuperà di gestire la supply chain. Bisognerà cambiare il modo in cui si pensa alle catene produttive, eliminando interamente alcuni livelli intermedi e ripensandone altri.

Verso il futuro: ulteriori proposte e innovazioni

Nonostante lo sviluppo dell'AM per come è stato presentato in questa tesi sia nelle sue prime fasi di espansione, non mancano gli studi che riguardano ulteriori innovazioni da applicare alla tecnologia. In questa sezione se ne esploreranno alcune tra le più promettenti.

Stampa 4D

La stampa 4D prende ovviamente il nome dalla stampa 3D, nome divulgativo dato alla fabbricazione additiva. La particolarità della stampa 4D sta nel fatto che ai pezzi viene aggiunta un'altra dimensione, ovvero la capacità di muoversi in risposta ad uno stimolo esterno.

I materiali impiegati sono detti "smart", perché possiedono caratteristiche particolari, e possono essere divisi in:

- Shape memory
- Self-healing
- Metamaterials

I primi sono detti così perché in grado di cambiare la loro forma nel tempo in risposta ad uno stimolo (Ryan et al., 2021), e possono essere di tipo polimerico, ceramico, metallico o ibrido. Le strutture che vanno a formarsi durante la fabbricazione permettono al pezzo di cambiare forma, di solito quando vengono varcate certe soglie di temperatura. In particolare, sono molto adatti alla stampa 4D i polimeri shape-memory, perché sono compatibili con molti processi e tecnologie AM.

I metamaterials sono materiali ingegnerizzati dall'uomo che possiedono proprietà che non appartengono ai materiali naturali. Le applicazioni più diffuse sono per sensori, antenne e pannelli fonoassorbenti.

I materiali self-healing, invece, sono in grado di adattarsi ai cambiamenti per aumentare la durata della loro vita, e possono essere impiegati, per esempio, nell'elettronica e nella sanità. Il materiale si guarisce spontaneamente quando viene "ferito". Quelli che si riparano in modo spontaneo sono detti autonomi, quelli che hanno bisogno di un input esterno sono detti non autonomi.

Gli stimoli possono essere di vario tipo a seconda del materiale e della struttura del pezzo: di cambiamento del pH, termici, luminosi ed elettromagnetici per fare degli esempi.

Vista la complessità dei sistemi e dei materiali, i requisiti da rispettare per la stampa 4D sono molto più stringenti di quelli per l'AM classico. Prima di tutto le stampanti: esse devono essere compatibili con il materiale di partenza (Melly et al., 2020). Se il meccanismo di cambio della forma è dovuto a differenze tra le proprietà di materiali diversi che compongono lo stesso pezzo, allora la macchina deve essere in grado di gestire entrambi i materiali con le composizioni diverse. La struttura dei pezzi stampati è dinamica, quindi è necessario prevedere il comportamento del pezzo in risposta agli stimoli. Ciò avviene grazie all'uso di modelli matematici che ne studiano la forma finale.

Le applicazioni di questa tecnologia sono multiple, soprattutto nel settore medico-sanitario. Si possono fabbricare ad esempio degli stent, tubi metallici che vengono inseriti negli organi cavi, come intestino o vasi sanguigni, e successivamente si espandono. Vengono usati per svariati obiettivi. Gli stent stampati in 4D sono in grado di espandersi in risposta alla temperatura corporea del soggetto, e sono più sicuri di quelli statici.

Per quanto riguarda l'elettronica, si possono creare dei dispositivi in grado di adattarsi alla forma del corpo di chi li usa, per esempio per le tecnologie ad impianto sottocutaneo, tessuti artificiali o monitoraggio della salute.

Nell'industria aerospaziale, possono essere impiegati le strutture "morphing", che cambiano forma a seconda delle condizioni ambientali. Possono essere integrati nelle strutture per cambiare a proprio vantaggio i coefficienti di espansione termica e facilitarne la deformazione, oppure per creare oggetti, come le ali di un aereo, che cambiano la loro forma quando attivati, come in figura.

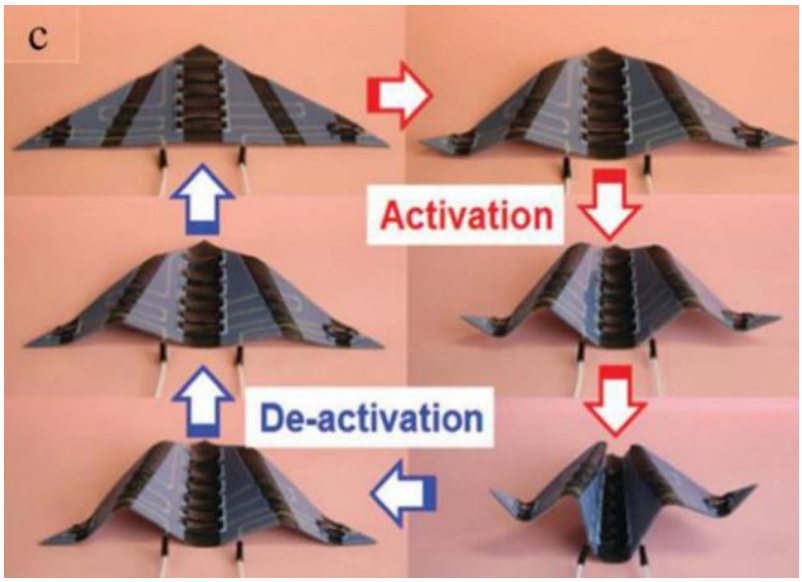


Figura 28: Esempio di struttur realizzata tramite stampa 4D in grado di cambiare forma. Fonte: Melly et al., (2020).

Molti gruppi stanno investendo somme ingenti per la ricerca e lo sviluppo di questa tecnologia. Con l'espansione dell'industria della fabbricazione additiva, si prevede che in futuro si possa diffondere in modo importante anche la stampa 4D.

Altre proposte

Siccome l'interesse verso l'AM è molto cresciuto negli ultimi anni, non mancano gli studi riguardanti tecniche di programmazione della produzione, ottimizzazione delle risorse e automazione dei processi. In questo paragrafo si farà luce su alcune ricerche svolte in questi ambiti.

Per esempio, Baumung & Fomin (2018) sviluppano un modello per programmare la produzione industriale dei pezzi in AM che prevede, al posto di assegnare ogni volta il singolo job ad una macchina, che il lavoro delle macchine vari in modo dinamico a seconda dei requisiti e dell'orario lavorativo del personale. I pezzi da produrre non sono quindi assegnati ognuno ad una sola macchina, ma sono raggruppati in una di esse in base alla disponibilità e al volume di produzione di quel momento. Il modello si muove secondo tre parametri: in base alle modifiche negli ordini, alle risorse di produzione e alla disponibilità delle macchine.

Se c'è un cambio in un ordine (aggiunta, rimozione, modifica), inizia la fase di processamento del nuovo ordine. Un software esamina i modelli 3D dei pezzi da produrre, il numero di pezzi

tempi e modi di produzione e configurazioni particolari. In seguito, vengono raggruppati i pezzi che possono essere prodotti insieme sulla stessa macchina e viene schedulata la produzione. Chiaramente, il software tiene in considerazione anche le altre variabili come gli orari di produzione, i possibili buffer, tempi di rimozione e manutenzione.

Questo studio presenta un'idea che, se messa in pratica, contribuirebbe a rendere i processi AM ancora più flessibili e ottimizzati. Sebbene anche gli autori ammettano che ulteriori ricerche sono necessarie per aumentare la precisione del modello, sussistono le premesse perché esso si riveli vincente.

Klahn et al. (2020), invece, si concentrano sul settore medicale e propongono di combinare insieme automazione del design e AM per la creazione di simulatori medici più diversificati. Essi implementano un modello CAD che si adatta automaticamente una volta inseriti i parametri del corpo che si vuole ricreare (età, sesso, indice di massa corporea). I parametri servono per calcolare le caratteristiche del corpo del modello come lo spessore della pelle e la percentuale di massa grassa, mentre l'etnia dipende dalle diverse colorazioni del silicone usato per ricreare il tessuto cutaneo.

In questo modo più modelli fisici diversi possono essere utilizzati per i test, e gli specializzandi medici saranno più pronti ad affrontare le situazioni di emergenza sul posto di lavoro.

Le nuove applicazioni dell'AM non si limitano solo a quelle elencate. Sono sempre più diffuse anche quelle per la fabbricazione di piccole strutture civili. Per esempio, nel 2016 è stato fabbricato, in Spagna, un ponte pedonale lungo dodici metri (Zastrow, 2020). Fu prodotto in lattice e fu studiata una geometria in grado di massimizzare la forza e minimizzare la quantità di materiale utilizzato. Anche un'azienda di Amsterdam si è cimentata nella realizzazione di un ponte, ma utilizzando leghe metalliche. Il ponte dovrebbe essere posto su un canale della città. Questo tipo di strutture non vengono realizzate in una sola sessione di stampa, ma vengono prodotti vari componenti che si assemblano in seguito. Una start-Up di Los Angeles, invece, ha dichiarato di stare costruendo un razzo quasi interamente usando la fabbricazione additiva, ma sono molte e in considerevole aumento le nuove idee e applicazioni che questo tipo di aziende stanno immaginando per l'AM. L'unica certezza, però, è che il futuro della tecnologia è luminoso e tutto da scoprire.

6. Riflessioni conclusive

In questa tesi si è prima di tutto introdotta la tecnologia della fabbricazione additiva, presente già dalla fine degli anni ’80, ma che ha visto una crescita esponenziale nell’ultimo decennio ed un interesse sempre crescente, soprattutto nei settori medicale, aerospaziale e Automotive.

Dopo una presentazione delle tecnologie disponibili sul mercato, si è fatto il quadro generale della situazione attuale, presentando vantaggi, svantaggi e ostacoli da superare per uno sviluppo più sostenuto di questa tecnologia.

Nel secondo capitolo sono state introdotte le filosofie Lean e Agile, e presentate le loro caratteristiche principali. Per quanto riguarda il Lean, sono stati elencati tutti gli sprechi ed analizzate nel dettaglio le implicazioni di ognuno di essi. Le emissioni di gas serra, visti gli obiettivi climatici fissati per i prossimi anni, sono state considerate alla stregua degli altri sette sprechi identificati da Ohno. In seguito, sono stati declinati i princìpi fondamentali della filosofia Agile, ovvero i concetti di flessibilità, Postponement e decoupling point. Si è visto poi come, in realtà, queste due filosofie che sono da molti considerate agli antipodi possano essere complementari, e che i guadagni più alti in termini di agilità combinata alla riduzione degli sprechi, ovviamente, si possono ottenere solo applicando una delle tante sfumature che stanno nel mezzo.

Nei capitoli tre e quattro sono stati analizzati i benefici che l’AM può portare in una catena produttiva industriale in termini Lean e Agile. Si è visto come questa tecnologia possa giocare un ruolo centrale nella riduzione o addirittura nell’eliminazione degli sprechi e al contempo garantire un’estrema flessibilità, gettando le basi, al netto del superamento di alcune barriere tecnologiche e sociali, per una Mass Customization.

Nell’ultimo capitolo, infine, sono stati forniti esempi di come l’AM potrebbe essere inserito nelle catene produttive moderne, trattando anche le potenzialità di sviluppo future della tecnologia. Sul finale dell’elaborato, infatti, sono state presentate alcune delle innovazioni su cui si sta investendo maggiormente, che hanno le potenzialità per rivoluzionare alcuni settori in cui l’AM è già piuttosto presente e più sviluppato, come l’aerospaziale e il medicale.

Si può dire che, sotto certi aspetti, l'AM sia stato accolto da alcuni con eccessivo entusiasmo, presentandolo come una rivoluzione incredibile e la risposta a tutti i problemi della produzione industriale moderna. Dall'analisi presentata in questa tesi, si evince che ad oggi non può essere così. La tecnologia ha sicuramente un potenziale immenso e potrebbe essere veramente un punto di svolta, ma solo al netto di ulteriori sviluppi e, probabilmente, solo in alcuni settori. In ogni caso, la comunità scientifica manifesta un certo scetticismo nel pensare ad una completa sostituzione delle tecniche produttive attuali con l'AM, anche nel futuro.

Lo scenario futuro che si può immaginare dalla letteratura esaminata è senza dubbio uno in cui l'AM è diffusa molto più di ora, con alcuni settori che la impiegano per la produzione su grande scala di alcuni componenti, ma affiancandole comunque dei sistemi tradizionali per realizzarne altri. A seconda del modello di business adottato, saranno molti i modi in cui l'AM e la produzione tradizionali saranno combinati insieme, per raggiungere obiettivi diversi. Per il settore aerospaziale sarà per alleggerire il più possibile i mezzi, mentre per altri settori l'obiettivo finale potrebbe essere quello di offrire il prodotto più personalizzato possibile al minor costo possibile, oppure di raggiungere tempi di consegna dell'ordine delle ore e non più di giorni o settimane.

Non si sa ancora quale ruolo abbia giocato la pandemia di Sars-Cov2 nell'ambito della crescita del mercato e della ricerca e lo sviluppo delle innovazioni trattate nell'ultimo capitolo. Per valutare al meglio questo impatto si dovranno attendere mesi, perché per ora possono essere fatte solo previsioni. Tuttavia, alcuni studiosi hanno usato l'AM per la produzione di valvole respiratorie, che hanno contribuito a salvare vite, fornendo un'ulteriore dimostrazione dell'utilità di questa tecnologia in campo medico nonché un esempio in più di applicazione.

Le applicazioni dell'AM, infatti, sono moltissime, e la maggior parte sono probabilmente ancora da scoprire. Sotto questo aspetto, un ostacolo è sicuramente la forma mentis acquisita da chi ha passato molti anni lavorando con le tecniche tradizionali e che quindi, come è normale che sia, trova complicato pensare fuori dagli schemi ed esplorare nuove frontiere.

Non resta che attendere per valutare nei prossimi anni il reale grado di espansione del mercato e di adozione della tecnologia, nella speranza che le barriere esistenti vengano abbattute al più presto e che si possano sfruttare al massimo, in futuro, tutti i vantaggi offerti dall'AM per la creazione di ulteriore valore non solo per le imprese ed i mercati, ma anche per

i consumatori, mantenendo sempre alta l'attenzione verso il pianeta e gli obiettivi climatici impostati per il 2050.

Ringraziamenti

Questa tesi è la summa di cinque meravigliosi anni, fatti di timori, ansie, notti insonni e studio matto e disperatissimo, ma anche di gioie, risate, viaggi, feste e giornate memorabili. Per tutto questo, ringrazio prima di tutto i miei genitori, grazie ai quali nulla di quello che ho vissuto in questi anni sarebbe stato possibile, e che non hanno mai smesso di supportarmi neanche per un momento.

Ringrazio la mia ragazza, Ilaria, che è sempre stata al mio fianco ed è stata una luce nei momenti più bui, ed il mio amico Federico che anche se lontano, mi è stato comunque vicino.

Ringrazio il mio coinquilino e grande amico Diego, che non so come abbia fatto a sopportarmi per ben tre anni di convivenza, con cui ho condiviso gran parte del mio percorso e, sinceramente, non avrei potuto immaginare un compagno di viaggio migliore, e con lui ringrazio il Dream Team: Giulia e Gaia, e tutti i miei fantastici compagni di corso con cui ho condiviso momenti che non dimenticherò mai e porterò per sempre nel cuore.

Ringrazio inoltre tutti i miei amici e le mie amiche, pochi ma buoni, che anche se non siamo riusciti a vederci o a sentirci spesso, mi hanno sempre sostenuto senza esitazioni.

Vorrei dire grazie infine a tutte le persone che ho incontrato in questo percorso, perché ognuna di esse ha contribuito alla mia crescita personale. C'è ancora molto da lavorare, questo è sicuro, ma grazie a tutti loro posso iniziare il mio viaggio nell'età adulta con più consapevolezza e fiducia.

Bibliografia

Achillas, C., Aidonis, D., Iakovou, E., Thymianidis, M., & Tzetzis, D. (2015). A methodological framework for the inclusion of modern additive manufacturing into the production portfolio of a focused factory. *Journal of Manufacturing Systems*, *37*, 328–339. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2014.07.014

Al Rashid, A., Khan, S. A., G. Al-Ghamdi, S., & Koç, M. (2020). Additive manufacturing: Technology, applications, markets, and opportunities for the built environment. *Automation in Construction*, *118*(June), 103268. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103268

AMFG. (2019). *the Additive Manufacturing Landscape 2019 Key Trends and Analyses*.

Arora, P. K., Arora, R., Haleem, A., & Kumar, H. (2020). Application of Additive manufacturing in challenges posed by COVID-19. *Materials Today: Proceedings*. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.323

Attaran, M. (2017). The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing. *Business Horizons*, *60*(5), 677–688. https://doi.org/10.1016/j.bushor.2017.05.011

Atzeni, E., & Salmi, A. (2012). Economics of additive manufacturing for end-usable metal parts. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *62*(9–12), 1147–1155. https://doi.org/10.1007/s00170-011-3878-1

Ballardini, R. M., Flores Ituarte, I., & Pei, E. (2018). Printing spare parts through additive manufacturing: legal and digital business challenges. *Journal of Manufacturing Technology Management*, *29*(6), 958–982. https://doi.org/10.1108/JMTM-12-2017-0270

Balogun, V. A., Kirkwood, N., & Mativenga, P. T. (2015). *Energy-consumption-and-carbon-footprint-analysis-of-Fused-Deposition-Modelling.doc*. *September*.

Baumung, W., & Fomin, V. V. (2018). Optimization Model to Extend Existing Production Planning and Control Systems for the Use of Additive Manufacturing Technologies in the

Industrial Production. *Procedia Manufacturing*, *24*, 222–228. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.06.035

Beitinger, G. (2012). Lean manufacturing. *Plant Engineering*, *66*(10), 37–40. https://doi.org/10.4018/978-1-5225-9615-8.ch006

Berman, B. (2012). 3-D printing: The new industrial revolution. *Business Horizons*, *55*(2), 155–162. https://doi.org/10.1016/j.bushor.2011.11.003

Böckin, D., & Tillman, A. M. (2019). Environmental assessment of additive manufacturing in the Automotive industry. *Journal of Cleaner Production*, *226*(April), 977–987. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.086

Bogers, M., Hadar, R., & Bilberg, A. (2016). Additive manufacturing for consumer-centric business models: Implications for supply chains in consumer goods manufacturing. *Technological Forecasting and Social Change*, *102*, 225–239. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2015.07.024

Boston Consulting Group. (2017). *Get ready for industrialized Additive Manufacturing*. *May*, 1–15. https://www.bcg.com/publications/2017/lean-manufacturing-industry-4.0-get-ready-for-industrialized-additive-manufacturing.aspx

Brom, A., Gorlacheva, E., & Pekshev, I. (2017). The perspectives of additive manufacturing technologies implementation in mass production of short range unmanned aerial vehicle. *2017 International Conference on Mechanical, System and Control Engineering, ICMSC 2017*, 27–30. https://doi.org/10.1109/ICMSC.2017.7959436

Brooks, H. L., Rennie, A. E. W., Abram, T. N., Mcgovern, J., & Caron, F. (2011). *Variable Fused Deposition Modelling – Analysis of Benefits , Concept Design and Tool Path Generation . May 2014*. https://doi.org/10.1201/b11341-83

Carbon3D. (n.d.). *Carbon DLS*. https://www.carbon3d.com/3d-printer-models-carbon/our-technology/

Chan, H. K., Griffin, J., Lim, J. J., Zeng, F., & Chiu, A. S. F. (2018). The impact of 3D Printing Technology on the supply chain: Manufacturing and legal perspectives. *International*

Journal of Production Economics, *205*(March), 156–162. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.09.009

Chen, T. C. T., & Lin, Y. C. (2019). A three-dimensional-printing-based agile and ubiquitous additive manufacturing system. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, *55*(July 2017), 88–95. https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.07.008

Chen, T., & Lin, Y. C. (2017). Feasibility Evaluation and Optimization of a Smart Manufacturing System Based on 3D Printing: A Review. *International Journal of Intelligent Systems*, *32*(4), 394–413. https://doi.org/10.1002/int.21866

Chergui, A., Hadj-Hamou, K., & Vignat, F. (2018). Production scheduling and nesting in additive manufacturing. *Computers and Industrial Engineering*, *126*(September), 292–301. https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.09.048

Christopher, M. (2000). *The Agile Supply Chain Competing in Volatile Markets*. *44*, 37–44.

Chu, Y. T., & Su, H. N. (2014). Understanding patent portfolio and development strategy of 3D printing technology. *PICMET 2014 - Portland International Center for Management of Engineering and Technology, Proceedings: Infrastructure and Service Integration*, 1407–1415.

Cotteleer, M. (2014). 3D opportunity for production: Additive Manufacturing makes its business case. *Deloitte Review*, *15*, 146–161.

Eyers, D. (2020). Managing 3D Printing. In *Managing 3D Printing*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-23323-5

Eyers, D. R., Potter, A. T., Gosling, J., & Naim, M. M. (2018). The flexibility of industrial additive manufacturing systems. *International Journal of Operations and Production Management*, *38*(12), 2313–2343. https://doi.org/10.1108/IJOPM-04-2016-0200

Fera, M., Macchiaroli, R., Fruggiero, F., & Lambiase, A. (2018). A new perspective for production process analysis using additive manufacturing—complexity vs production volume. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *95*(1–4), 673–685. https://doi.org/10.1007/s00170-017-1221-1

Fogliatto, F. S., Da Silveira, G. J. C., & Borenstein, D. (2012). The Mass Customization decade: An updated review of the literature. *International Journal of Production Economics*, *138*(1), 14–25. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.03.002

Ford, S. L. N. (2014). Additive Manufacturing Technology : Potential Implications for U . S . Manufacturing Competitiveness. *Journal of International Commerce and Economics (USA)*, *6*(September), 1–35.

Gebler, M., Schoot Uiterkamp, A. J. M., & Visser, C. (2014). A global sustainability perspective on 3D printing technologies. *Energy Policy*, *74*(C), 158–167. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.08.033

Geroski, P. A. (2000). Models of technology diffusion. *Research Policy*, *29*(4–5), 603–625. https://doi.org/10.1016/S0048-7333(99)00092-X

Ghobadian, A., Talavera, I., Bhattacharya, A., Kumar, V., Garza-Reyes, J. A., & O'Regan, N. (2020). Examining legitimatisation of additive manufacturing in the interplay between innovation, lean manufacturing and sustainability. *International Journal of Production Economics*, *219*(June 2018), 457–468. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.06.001

Gibson, I., Rosen, D. W., & Stucker, B. (2016). *Additive Manufacturing Technologies* (Vol. 53, Issue 9). https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004

Harris, B. A. (2004). *Reaping the Rewards THE CALLS FOR LEAN THINKING THAT BEING LEAN IS NOT ENOUGH - of Agile Thinking*.

Hettesheimer, T., Hirzel, S., & Roß, H. B. (2018). Energy savings through additive manufacturing: an analysis of selective laser sintering for Automotive and aircraft components. *Energy Efficiency*, *11*(5), 1227–1245. https://doi.org/10.1007/s12053-018-9620-1

Holmström, J., & Partanen, J. (2014). Digital manufacturing-driven transformations of service supply chains for complex products. *Supply Chain Management*, *19*(4), 421–430. https://doi.org/10.1108/SCM-10-2013-0387

Hopp, W. J., & Spearman, M. L. (2004). To pull or not to pull: What is the question?

Manufacturing and Service Operations Management, *6*(2), 133–148. https://doi.org/10.1287/msom.1030.0028

Hopp, W. J., & Spearman, M. L. (2008). *Factory Physics*.

Ilg, J., Oehler, A., & Lucke, D. (2019). A suitability analysis method for additive manufacturing technologies in small and medium-sized companies. *Procedia CIRP*, *81*, 612–617. https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.164

Iqbal, T., Jajja, M. S. S., Bhutta, M. K., & Qureshi, S. N. (2020). Lean and agile manufacturing: complementary or competing capabilities? *Journal of Manufacturing Technology Management*, *31*(4), 749–774. https://doi.org/10.1108/JMTM-04-2019-0165

Jiang, J. (2020). A novel fabrication strategy for additive manufacturing processes. *Journal of Cleaner Production*, *272*, 122916. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122916

Joaquin, M., Alexander, A., Matthias, B., Jens, H., & Kristin, P. (2019). Enhancing the Additive Manufacturing process for spare parts by applying Agile Hardware Development principles. *2019 IEEE 10th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies, ICMIMT 2019*, *Icmimt*, 109–116. https://doi.org/10.1109/ICMIMT.2019.8712045

Karimi, S., Kwon, S., & Ning, F. (2021). Energy-aware production scheduling for additive manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, *278*, 123183. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123183

Kellens, K., Mertens, R., Paraskevas, D., Dewulf, W., & Duflou, J. R. (2017). Environmental Impact of Additive Manufacturing Processes: Does AM Contribute to a More Sustainable Way of Part Manufacturing? *Procedia CIRP*, *61*(Section 3), 582–587. https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.153

Khajavi, S. H., Partanen, J., & Holmström, J. (2014). Additive manufacturing in the spare parts supply chain. *Computers in Industry*, *65*(1), 50–63. https://doi.org/10.1016/j.compind.2013.07.008

Kietzmann, J., Pitt, L., & Berthon, P. (2015). Disruptions, decisions, and destinations: Enter the

age of 3-D printing and additive manufacturing. *Business Horizons*, *58*(2), 209–215. https://doi.org/10.1016/j.bushor.2014.11.005

Klahn, C., Bührer, K., Engeli, R., & Meboldt, M. (2020). Design Automation and Additive Manufacturing for Anatomically Diversified Medical Simulators. *Procedia CIRP*, *91*, 458–463. https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.199

Kleer, R., & Piller, F. T. (2019). Local manufacturing and structural shifts in competition: Market dynamics of additive manufacturing. *Intern. Journal of Production Economics*, *216*(April), 23–34. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.04.019

Kumar, S., & Czekanski, A. (2018). Roadmap to sustainable plastic additive manufacturing. *Materials Today Communications*, *15*(March 2017), 109–113. https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2018.02.006

Kwok, T.-H., Ye, H., Chen, Y., Zhou, C., & Xu, W. (2017). *Mass Customization : Reuse of Digital Slicing for Additive Manufacturing*. *17*(June), 1–8. https://doi.org/10.1115/1.4034010

Li, Y., Jia, G., Cheng, Y., & Hu, Y. (2017). Additive manufacturing technology in spare parts supply chain: a comparative study. *International Journal of Production Research*, *55*(5), 1498–1515. https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1231433

Lithgow, D., Morrison, C., Pexton, G., Panarotto, M., Muller, J. R., Almefelt, L., & McLaren, A. (2019). *DESIGN AUTOMATION FOR CUSTOMISED AND LARGE-SCALE DESIGN AUTOMATION FOR CUSTOMISED AND LARGE*-. https://doi.org/10.1017/dsi.2019.74

Liu, P., Huang, S. H., Mokasdar, A., Zhou, H., & Hou, L. (2014). The impact of additive manufacturing in the aircraft spare parts supply chain: Supply chain operation reference (scor) model based analysis. *Production Planning and Control*, *25*(October), 1169–1181. https://doi.org/10.1080/09537287.2013.808835

Liu, Z., Jiang, Q., Ning, F., Kim, H., Cong, W., Xu, C., & Zhang, H. C. (2018). Investigation of energy requirements and environmental performance for additive manufacturing processes. *Sustainability (Switzerland)*, *10*(10). https://doi.org/10.3390/su10103606

Mehrpouya, M., Dehghanghadikolaei, A., Fotovvati, B., Vosooghnia, A., Emamian, S. S., &

Gisario, A. (2019). The Potential of Additive Manufacturing in the Smart. *Applied Science*, 34.

Melly, S. K., Liu, L., Liu, Y., & Leng, J. (2020). On 4D printing as a revolutionary fabrication technique for smart structures. *Smart Materials and Structures*, *29*(8). https://doi.org/10.1088/1361-665X/ab9989

Minetola, P., & Eyers, D. (2018). Energy and Cost Assessment of 3D Printed Mobile Case Covers. *Procedia CIRP*, *69*(May), 130–135. https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.11.065

Montero, J., Weber, S., Bleckmann, M., Atzberger, A., Wirths, L., & Paetzold, K. (2019). Spare part production in remote locations through Additive Manufacturing enhanced by agile development principles. *Proceedings - 2019 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation, ICE/ITMC 2019*. https://doi.org/10.1109/ICE.2019.8792631

Nadagouda, M. N., Ginn, M., & Rastogi, V. (2020). A review of 3D printing techniques for environmental applications. *Current Opinion in Chemical Engineering*, *28*, 173–178. https://doi.org/10.1016/j.coche.2020.08.002

Nur-A-Tomal, M. S., Pahlevani, F., & Sahajwalla, V. (2020). Direct transformation of waste children's toys to high quality products using 3D printing: A waste-to-wealth and sustainable approach. *Journal of Cleaner Production*, *267*, 122188. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122188

Nyman, H. J., & Sarlin, P. (2014). From bits to atoms: 3D printing in the context of supply chain strategies. *Proceedings of the Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, *May*, 4190–4199. https://doi.org/10.1109/HICSS.2014.518

Ohno, T. (1988). *Toyota Production System*. Diamond Inc. file:///C:/Users/youhe/Downloads/kdoc_o_00042_01.pdf

Pereira, T., Kennedy, J. V., & Potgieter, J. (2019). A comparison of traditional manufacturing vs additive manufacturing, the best method for the job. *Procedia Manufacturing*, *30*, 11–18. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.003

Petrovic, V., Vicente Haro Gonzalez, J., Jordá Ferrando, O., Delgado Gordillo, J., Ramon Blasco Puchades, J., & Portoles Grinan, L. (2011). Additive layered manufacturing: Sectors of industrial application shown through case studies. *International Journal of Production Research*, *49*(4), 1061–1079. https://doi.org/10.1080/00207540903479786

Pour, M. A., Zanardini, M., Bacchetti, A., & Zanoni, S. (2016). Additive Manufacturing Impacts on Productions and Logistics Systems. *IFAC-PapersOnLine*, *49*(12), 1679–1684. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.822

Priarone, P. C., & Ingarao, G. (2017). Towards criteria for sustainable process selection: On the modelling of pure subtractive versus additive/subtractive integrated manufacturing approaches. *Journal of Cleaner Production*, *144*, 57–68. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.165

Priarone, P. C., Lunetto, V., Atzeni, E., & Salmi, A. (2018). Laser powder bed fusion (L-PBF) additive manufacturing: On the correlation between design choices and process sustainability. *Procedia CIRP*, *78*, 85–90. https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.09.058

Qrunfleh, S., & Tarafdar, M. (2013). Lean and agile supply chain strategies and supply chain responsiveness: The role of strategic supplier partnership and Postponement. *Supply Chain Management: An International Journal*, *18*(6), 571–582. https://doi.org/10.1108/SCM-01-2013-0015

Reichwein, J., Vogel, S., Schork, S., & Kirchner, E. (2020). On the Applicability of Agile Development Methods to Design for Additive Manufacturing. *Procedia CIRP*, *91*, 653–658. https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.03.112

Rogers, H., Braziotis, C., & Pawar, K. S. (2017). Special issue on 3D printing: opportunities and applications for supply chain management. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, *47*(10), 950–953. https://doi.org/10.1108/IJPDLM-08-2017-0248

Rohde, J., Jahnke, U., Lindemann, C., Kruse, A., & Koch, R. (2019). Standardised product development for technology integration of additive manufacturing. *Virtual and Physical Prototyping*, *14*(2), 141–147. https://doi.org/10.1080/17452759.2018.1532801

Roland Berger. (2017). *Additive Manufacturing in Aerospace and Defense*. 1–37. https://www.rolandberger.com/publications/publication_pdf/roland_berger_additive_manufacturing.pdf

Ryan, K. R., Down, M. P., & Banks, C. E. (2021). Future of additive manufacturing: Overview of 4D and 3D printed smart and advanced materials and their applications. *Chemical Engineering Journal*, *403*(June 2020), 126162. https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126162

Sasson, A., & Johnson, J. C. (2016). The 3D printing order: variability, supercenters and supply chain reconfigurations. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, *46*(1), 82–94. https://doi.org/10.1108/IJPDLM-10-2015-0257

Schuh, G., Salmen, M., Kelzenberg, C., & De Lange, J. (2018). Integration of tool making into agile product development using industry 4.0 technologies and additive manufacturing technologies. *PICMET 2018 - Portland International Conference on Management of Engineering and Technology: Managing Technological Entrepreneurship: The Engine for Economic Growth, Proceedings*. https://doi.org/10.23919/PICMET.2018.8481931

Singh, J., Singh, H., Singh, A., & Singh, J. (2019). Managing industrial operations by Lean Thinking using value stream mapping and six sigma in manufacturing unit: Case studies. In *Management Decision* (Vol. 58, Issue 6). https://doi.org/10.1108/MD-04-2017-0332

Smelov, V. G., Kokareva, V. V., & Malykhin, A. N. (2014). Lean organization of additive manufacturing of aircraft purpose products. *International Journal of Engineering and Technology*, *6*(5), 2304–2309.

Stavropoulos, P., Foteinopoulos, P., Papacharalampopoulos, A., & Bikas, H. (2018). Addressing the challenges for the industrial application of additive manufacturing: Towards a hybrid solution. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, *1*(3), 157–168. https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2018.07.002

Stavropoulos, P., Lianos, A. K., Bikas, H., & Mourtzis, D. (2020). Skills Requirements for the 4 th Industrial Revolution: The Additive Manufacturing case . *MATEC Web of Conferences*, *318*, 01021. https://doi.org/10.1051/matecconf/202031801021

Strong, D., Kay, M., Conner, B., Wakefield, T., & Manogharan, G. (2018). Hybrid manufacturing – integrating traditional manufacturers with additive manufacturing (AM) supply chain. *Additive Manufacturing*, *21*(March), 159–173. https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.03.010

Swerea Swedish Research. (2017). *State-of-the-art for Additive Manufacturing of Metals Executive Summary*. *June*. http://www.metalliskamaterial.se/globalassets/3-forskning/rapporter/2016-03898---state-of-the-art-for-additive-manufacturing-of-metals-2_1.pdf

Tarafdar, M., & Qrunfleh, S. (2017). Agile supply chain strategy and supply chain performance : complementary roles of supply chain practices and information systems capability for agility. *International Journal of Production Research*, *55*(4), 925–938. https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1203079

Thomas, D. S., & Gilbert, S. W. (2015). Costs and cost effectiveness of additive manufacturing: A literature review and discussion. *Additive Manufacturing: Costs, Cost Effectiveness and Industry Economics*, 1–96.

Turner, F., Merle, A., & Gotteland, D. (2020). Enhancing consumer value of the co-design experience in mass. *Journal of Business Research*, *117*(June), 473–483. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2020.05.052

Varsha Shree, M., Dhinakaran, V., Rajkumar, V., Bupathi Ram, P. M., Vijayakumar, M. D., & Sathish, T. (2020). Effect of 3D printing on supply chain management. *Materials Today: Proceedings*, *21*, 958–963. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.09.060

Verboeket, V., & Krikke, H. (2019). Additive Manufacturing: A Game Changer in Supply Chain Design. *Logistics*, *3*(2), 13. https://doi.org/10.3390/logistics3020013

Wasley, T., Li, J., Kay, R., Ta, D., Shephard, J., Stringer, J., Smith, P., Esenturk, E., & Connaughton, C. (2016). Enabling Rapid Production and Mass Customisation of Electronics Using Digitally Driven Hybrid Additive Manufacturing Techniques. *Proceedings - Electronic Components and Technology Conference*, *2016-Augus*, 849–856. https://doi.org/10.1109/ECTC.2016.187

Weller, C., Kleer, R., & Piller, F. T. (2015). Economic implications of 3D printing: Market structure models in light of additive manufacturing revisited. *International Journal of Production Economics*, *164*, 43–56. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.02.020

Wohlers Associates Inc. (2017). *Wohlers Report_2017.pdf*.

Womack, J. P., & Jones, D. T. (1997). Lean Thinking—Banish Waste and Create Wealth in your Corporation. *Journal of the Operational Research Society*, *48*(11), 1148–1148. https://doi.org/10.1038/sj.jors.2600967

Yang, B., & Burns, N. D. (2003). *Implications of Postponement for the supply chain*. *May 2014*. https://doi.org/10.1080/00207544031000077284

Zastrow, M. (2020). The new 3D printing. *Nature*, *578*(February), 1–14. http://www.globalview.gr/2016/06/30/62949/

Sitografia

https://www.replicatore.it/il-mercato-globale-della-produzione-additiva-2019-ha-superato-i-10-miliardi-di-dollari/

https://www.adidas.com/us/4D

https://www.carbon3d.com/3d-printer-models-carbon/our-technology/

https://www.3dquickprinting.com

https://www.theorthocosmos.com

https://www.fabbaloo.com

https://www.all3dp.com