



Politecnico di Torino

Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale (DIMEAS)

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Orientamento in Fabbricazione Additiva

Tesi di Laurea Magistrale

CONFRONTO TRA ADDITIVE MANUFACTURING E TECNOLOGIE TRADIZIONALI PER LA PROGETTAZIONE E PRODUZIONE DI COMPONENTI AEROSPAZIALI

Candidata

Alessandra Musicò

Relatore

Prof. Alessandro Salmi

Supervisore aziendale

Ing. Massimo Chiampi

Tesi in azienda presso

Thales Alenia Space – Torino

15 Aprile 2021

Indice

| | |
|---|-----------|
| Introduzione | 7 |
| Capitolo 1: l'Additive Manufacturing..... | 9 |
| 1.1 Introduzione all'Additive Manufacturing | 9 |
| 1.1.1 Cenni storici..... | 9 |
| 1.1.2 L'Additive Manufacturing oggi: aspetti economici e sostenibilità ambientale | 12 |
| 1.1.3 Vantaggi e svantaggi..... | 19 |
| 1.1.4 Tecniche di fabbricazione additiva e materiali..... | 22 |
| 1.1.5 Tecniche di fabbricazione additiva per i metalli..... | 23 |
| 1.1.6 Laser Deposition | 24 |
| 1.1.7 Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM) | 25 |
| 1.1.8 Tecniche di fabbricazione additiva per i polimeri | 27 |
| 1.1.9 Stereolitografia..... | 27 |
| 1.1.10 Polyjet/Project..... | 30 |
| 1.1.11 Direct Light Projection..... | 32 |
| 1.1.12 Drop on Demand | 34 |
| 1.1.13 Fused Deposition Modelling..... | 36 |
| 1.1.14 Selective Laser Sintering..... | 40 |
| 1.1.15 3D Printing per i materiali polimerici e ceramici..... | 43 |
| 1.2 Progettazione per l'Additive Manufacturing..... | 46 |
| 1.2.1 Il ciclo della fabbricazione additiva dal CAD alla stampa | 46 |
| 1.2.2 L'ottimizzazione topologica..... | 53 |
| 1.2.3 Design for Additive Manufacturing: DFAM | 56 |
| 1.3 Tecnologie a letto di polvere..... | 60 |
| 1.3.1 Le polveri metalliche | 60 |

| | |
|---|------------|
| 1.3.2 3 Dimensional Printing | 67 |
| 1.3.3 Selective Laser Melting (SLM) | 68 |
| 1.3.4 Electron Beam Melting | 74 |
| 1.3.5 SLM ed EBM a confronto | 80 |
| 1.3.6 Design for Laser Powder Bed Fusion (L-PBF)..... | 81 |
| 1.4 Post- processing | 89 |
| Capitolo 2: Applicazioni dell'Additive Manufacturing nel settore aerospaziale | 92 |
| 2.1 Introduzione..... | 92 |
| 2.2 Attuali applicazioni dell'AM in ambito aerospaziale..... | 93 |
| Capitolo 3: Confronto tra AM e tecnologie tradizionali..... | 100 |
| 3.1 Introduzione..... | 100 |
| 3.2 Tecniche ibride..... | 105 |
| Capitolo 4: Modello di costo per AM | 108 |
| 4.1 Introduzione..... | 108 |
| 4.2 I componenti..... | 109 |
| 4.3 Stima del build time..... | 110 |
| 4.4 Stima parametri dei componenti | 111 |
| 4.5 Stima dei costi..... | 112 |
| 4.6 I costi AM | 112 |
| 4.6.1 Costo del materiale | 113 |
| 4.6.2 Costo di stampa..... | 113 |
| 4.6.3 Costo rimozione supporti e sabbiatura | 113 |
| 4.7 I costi non AM | 114 |
| 4.7.1 Costo per i provini per il test di trazione..... | 114 |
| 4.7.2 Costo per la tomografia computerizzata..... | 114 |
| 4.7.3 Costo di post-machining..... | 115 |

| | |
|---|-------------|
| 4.7.4 Costo del trattamento termico | 116 |
| 4.8 Validazione del modello | 116 |
| 4.8.1 Le approssimazioni per validare il modello | 117 |
| 4.9 Conclusioni | 119 |
| Capitolo 5: Casi Applicativi - Trade Off | 121 |
| 5.1 Presentazione del caso applicativo | 121 |
| 5.2 L'IMV Adapter | 121 |
| 5.3 ECLSS | 122 |
| 5.3.1 Water Recovery System | 123 |
| 5.3.2 Air Revitalization System | 125 |
| 5.3.3. Oxygen Generation System | 125 |
| 5.3.4 Fire Detection and Suppression | 125 |
| 5.3.5 Temperature and Humidity Control | 126 |
| 5.4 Le risorse sulla Stazione Spaziale Internazionale | 126 |
| 5.5 Air distribution | 128 |
| 5.6 Applicazione del modello di costo agli IMV Adapter | 131 |
| 5.6.1 Re-Desing | 131 |
| 5.6.2 Stima del Build time | 132 |
| 5.6.3 Stima del costo degli IMV Adapter | 135 |
| 5.8 Trade off | 137 |
| Conclusioni | 139 |
| Indice delle figure | 140 |
| Indice delle tabelle | 143 |
| Bibliografia | 1444 |
| Ringraziamenti | 1466 |

Introduzione

L'Additive Manufacturing è una tecnologia di produzione piuttosto recente che incuriosisce e strizza l'occhio al futuro, anche se attualmente non è adatta a tutti gli ambiti produttivi, ma solo a quelli che possono sfruttarne appieno le sue potenzialità. In particolar modo la fabbricazione additiva trova impiego in applicazioni di nicchia per la realizzazione di pochi componenti di qualità, geometricamente particolari, personalizzabili e ad alto valore aggiunto, non a caso tra i settori trainanti troviamo l'industria aerospaziale, biomedica, dentale ed automotive, per citare i più importanti.

L'Additive Manufacturing ben si presta alle esigenze che la produzione di componenti per il settore aerospaziale impone, uno fra tutti il fattore peso, si stima approssimativamente un costo di circa 40 mila € per ogni kg lanciato in orbita, ecco che con l'ottimizzazione topologica l'additive concede uno strumento in più per ovviare a questo problema.

I componenti aerospaziali inoltre non vengono prodotti in serie, spesso si ha a che fare con pochi esemplari, quindi la fabbricazione additiva permette di risparmiare su eventuali attrezzature, necessarie invece nelle lavorazioni convenzionali. Altro beneficio è la possibilità di partire da un semplice modello CAD e di iniziare la produzione subito dopo la fase di progettazione, che consente libero sfogo alla creatività del progettista, riducendo anche i tempi, oltre i costi, della fase di sviluppo prodotto.

Il presente lavoro di tesi, svolto in collaborazione con Thales Alenia Space, nasce dall'esigenza di stilare un modello per l'Additive Manufacturing per stimare, a monte del processo produttivo, il costo di un componente aerospaziale ed in particolare valutarne la convenienza economica rispetto alla produzione con una tecnologia tradizionale.

Dopo una breve presentazione sull'AM, mettendone in luce vantaggi svantaggi e campi applicativi, è stato presentato il vasto panorama delle tecniche di fabbricazione additiva, effettuando un focus su quelle a letto di polvere per i materiali metallici ed in particolare sulla Selective Laser Melting (SLM), tecnologia alla base del modello di costo.

Sono stati indagati anche i materiali principalmente impiegati, incentrando l'attenzione sul delicato tema delle polveri metalliche. Inoltre sono stati presentati i principi chiave relativi alla

progettazione per l'AM, o Design for Additive Manufacturing (DFAM), e le tecniche di post-processing.

In seguito si è discusso delle applicazioni della fabbricazione additiva per il settore aerospaziale, mettendo in evidenza ancora di più i benefici che può trarre da questa tecnologia.

È stato anche effettuato un confronto tra l'AM e le lavorazioni tradizionali per sottolineare come le due tecnologie non siano in competizione, quanto invece siano l'una complementare all'altra.

Il cuore del lavoro di tesi si è incentrato sulla creazione di un modello di costo ad hoc per l'AM, traendo spunto dai vari approcci presenti in letteratura. Viene proposto un metodo semplificato per stimare il principale fattore di peso per il costo: il tempo di stampa, o build time. Inoltre per confermare l'accuratezza e l'affidabilità di tale modello si passerà alla fase di validazione, applicandolo a componenti gentilmente concessi da Thales Alenia Space, che sono stati in passato prodotti in AM e dei quali si conoscono i costi.

Infine ci si è concentrati sull'applicazione di tale modello su due specifici casi studio in ambito aerospaziale: gli Inter Module Ventilation Adapter, al fine di avere una stima sul loro costo, di effettuare un confronto con le tecnologie tradizionali e di valutarne la convenienza economica.

Capitolo 1: l'Additive Manufacturing

1.1 Introduzione all'Additive Manufacturing

1.1.1 Cenni storici

La fabbricazione additiva o additive manufacturing è una tecnica di produzione non convenzionale la cui nascita risale alla metà degli anni '80, più precisamente nel 1986 quando l'ingegnere ed inventore Charles W. Hull pubblicò il brevetto "Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography" che sanciva l'invenzione della tecnologia SLA o Stereolitografia. Charles Hull nel suo brevetto definisce la Stereolitografia come:

"Un sistema per generare oggetti tridimensionali creando un modello trasversale del componente da costituire, sulla superficie di un mezzo fluido capace di alterare il suo stato fisico in risposta a stimoli sinergici quali radiazione incidente, bombardamento di particelle o reazioni chimiche, in lamine adiacenti che rappresentano le rispettive sezioni trasversali dell'oggetto, che integrandosi tra loro, provvedono ad una progressiva costruzione laminare dell'oggetto desiderato, per cui un oggetto tridimensionale è creato da una superficie sostanzialmente planare del mezzo fluido durante il processo di formazione." [1]

La definizione è piuttosto generica e, nonostante le prime applicazioni prevedessero l'uso di resine liquide, Hull intuì fin da subito che il processo di costruzione strato su strato potesse estendersi non soltanto all'uso di materiali in forma liquida.

Charles Hull fondò anche l'azienda 3D Systems, tutt'oggi ai vertici del settore, ed inventò il formato universale cui ogni file CAD deve necessariamente essere convertito prima della stampa: il formato STL. Da quel momento inizia l'era della prototipazione rapida, detta Rapid Prototyping (RP), infatti le primissime tecniche di fabbricazione additiva erano volte alla realizzazione fisica di prototipi, concettuali funzionali e tecnici, in tempi relativamente brevi in quanto non era più necessario progettare e realizzare gli utensili per la produzione del prototipo, ma bastava semplicemente il file CAD.

Successivamente si diffusero il Rapida Casting (RC) e Rapid Tooling (RT), metodi che impiegano le tecnologie additive per produrre rispettivamente anime per fonderia ed inserti per stampi. Infine con il Rapid Manufacturing (RM) le applicazioni si ampliarono ulteriormente e si iniziano a realizzare produzioni di pre-serie.

Il 2000 rappresenta l'anno di svolta, da allora si può parlare di Additive Manufacturing come tecnologia per la fabbricazione di componenti definitivi, ciò è stato possibile grazie all'evoluzione delle tecniche stesse, se le prime erano limitate ai soli materiali polimerici e ceramici, il progresso scientifico ha permesso l'invenzione di metodi sempre più innovativi ed efficienti che ad oggi ci consentono di lavorare anche i materiali metallici.



Figura 1: Evoluzione storica AM [2]

La prima tecnica di fabbricazione additiva è caratterizzata dall'impiego di polimeri allo stato liquido, a partire dalla stereolitografia, Carl Deckard e altri ricercatori brevettarono un processo che prevedeva come materiale di partenza polveri termoplastiche: il Selective Laser Sintering (SLS), la prima tecnica a letto di polvere che utilizza un fascio laser per sinterizzare in maniera selettiva ogni singolo strato.

In seguito Scott Crump alla fine degli anni '80 brevettò la Fused Deposition Modeling (FDM), il processo prevedeva la deposizione di un filamento di materiale termoplastico contenuto in una bobina che veniva estruso al fine di creare in modo "additivo" ogni strato. Scott Crump fondò l'azienda Stratasys proprio per l'industrializzazione del processo FDM, ad oggi è uno dei pochi produttori di rilievo in ambito industriale, infatti data la semplicità della tecnica una volta scaduto il brevetto, il processo è stato ripreso da molti per la creazione di stampanti low cost non di impiego industriale e quindi con basse prestazioni.

A partire dal 1990 si applica la tecnologia SLS su polveri di materiali metallici. Inizialmente non avendo a disposizione laser potenti abbastanza per fondere i metalli, si impiegavano polveri con rivestimenti polimerici che avevano lo scopo di aggregare le particelle. Il laser infatti fondeva il polimero per realizzare le sezioni, si generava quindi il componente che presentava

un minimo di resistenza per essere manipolato, successivamente si effettuava il trattamento termico di infiltrazione dove il polimero veniva eliminato e sostituito da un altro metallo, solitamente basso fondente come il bronzo.

Nel 1995 si può parlare realmente di Selective Laser Sintering in quanto si è passati ad una fusione parziale delle polveri, esse erano composte da due materiali metallici, di cui uno basso fondente che veniva fuso ed aveva il compito di bagnare le altre polveri metalliche aggregandole. Rispetto al processo precedente non si ricorreva più a polveri pre-rivestite e di eliminava il trattamento in forno.

Dal 2000 con lo sviluppo di nuove sorgenti laser si è ottenuta la fusione completa e la ri-solidificazione di polveri metalliche dello stesso materiale, escludendo qualsiasi tipo di legante, si parla adesso di Selective Laser Melting (SLM). [2]

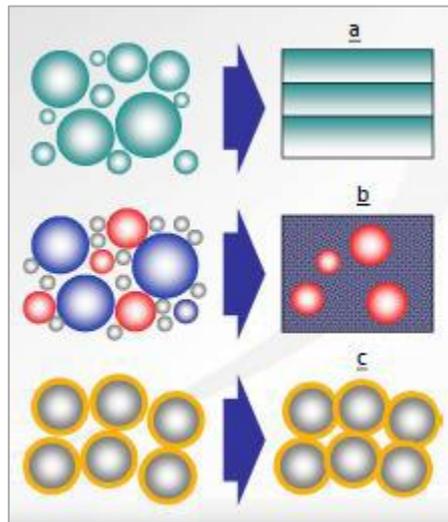


Figura 2: a) 2000, Selective Laser Melting; b) 1995, Selective Laser Sintering con polveri costituite da due materiali metallici; c) 1990, Selective Laser Sintering, con polveri metalliche e rivestimento polimerico

Attualmente i processi SLS e SLM si confondono, la differenza era legata a ragioni storiche quando la miscela metallica non raggiungeva, sotto l'effetto della radiazione laser, la completa fusione lasciando comunque delle porosità all'interno del componente. Allo stato attuale i laser consentono la completa fusione delle polveri e di conseguenza le porosità, se il processo è adeguatamente controllato, risultano assenti, raggiungendo una densità prossima al 100 %.

Un'ulteriore tecnologia in grado di lavorare i metalli è stata sviluppata nel 2002, si tratta dell'Electron Beam Melting (EBM), che si differenzia dalla precedente SLM principalmente per la sorgente energetica, che in questo caso è un fascio di elettroni opportunamente focalizzato e accelerato.

1.1.2 L'Additive Manufacturing oggi: aspetti economici e sostenibilità ambientale

Oggi le tecnologie a disposizione sono numerose, soprattutto dopo la scadenza del brevetto relativo alla stereolitografia, infatti le tecniche che coinvolgono i materiali polimerici si sono moltiplicate, ma anche quelle concernenti i materiali metallici hanno sperimentato un vero e proprio incremento per la produzione di componenti definitivi.

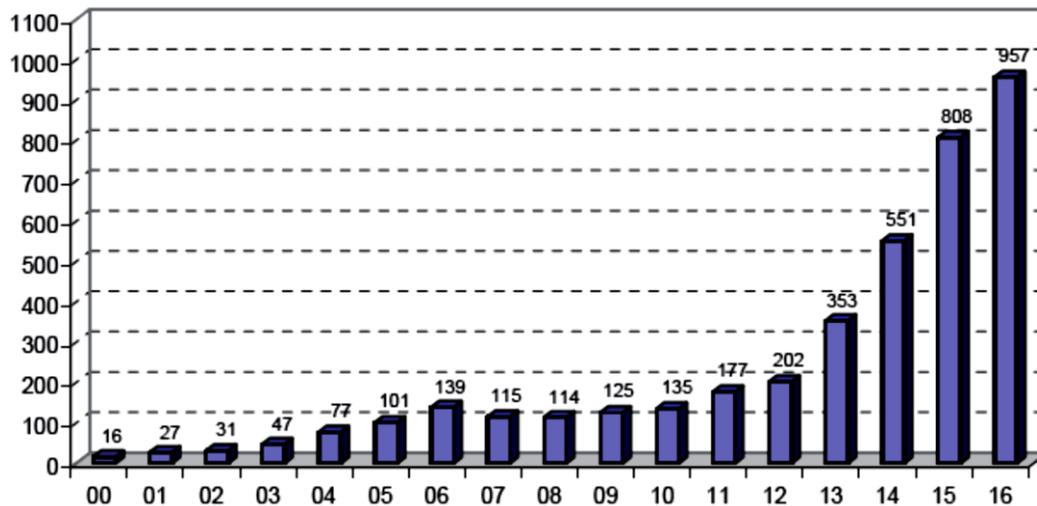


Figura 3: Sistemi AM per la produzione di parti metalliche dal 2000 al 2016

In Figura 3 si può osservare l'incremento, negli'anni che vanno dal 2000 al 2016, relativamente ai sistemi per la produzione in additive manufacturing di componenti definitivi in materiale metallico. Tra il 2015 ed il 2016 si ha un aumento del 18%, inoltre il 91% delle installazioni si riferiscono a sistemi che adoperano tecnologie a letto di polvere.[2]

Mentre più in generale il numero delle installazioni di sistemi AM dal 2006 al 2016 è mostrato in Figura 4:

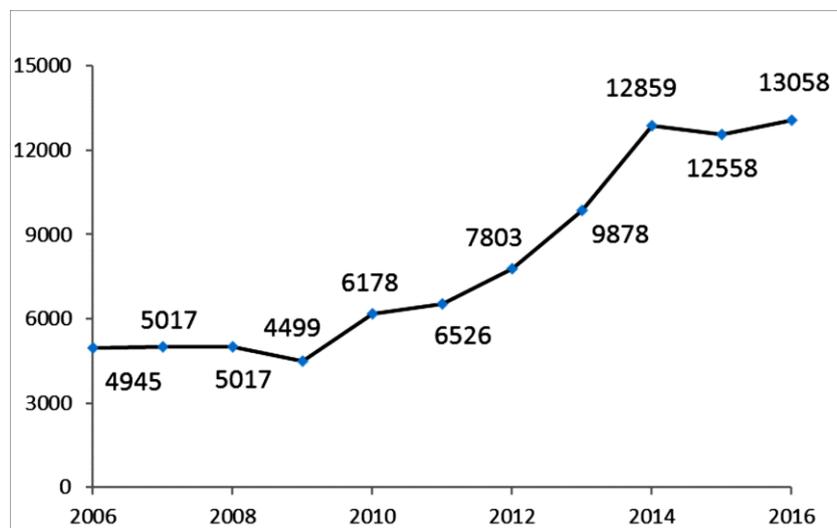


Figura 4: Andamenti installazioni di sistemi AM fino al 2016

L'attuale crescita del mercato non potrà che avere, in futuro, effetti positivi sulla competitività economica delle tecniche di fabbricazione additiva, ad esempio l'incremento della produzione di polveri ad hoc per l'additive ne ridurrà il costo, così come il miglioramento delle stampanti permetterà una riduzione del tempo di produzione ed un componente sempre meno soggetto a trattamenti di post-processing.

Nei due grafici a torta, mostrati in Figura 5, si può osservare la distribuzione geografica dei sistemi di AM relativamente all'anno 2016 e le quote di mercato dei produttori di stampanti 3D. Gli USA comprendono la fetta maggiore del mercato, ciò è sostenuto dal fatto che le più grandi aziende attive nel mercato mondiale sono proprio statunitensi: Stratasys specializzata in materiali polimerici per i processi Polyjet ed FDM, che detiene il 35,6% delle quote di mercato, seguita da 3D Systems con il 12,6%. [2]

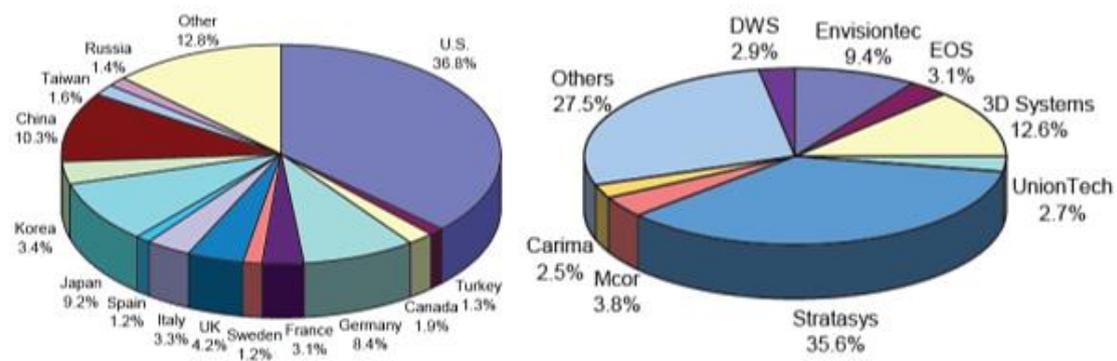


Figura 5: Sinistra: distribuzione geografica dei sistemi di AM nel 2016; Destra: quote di mercato dei produttori di sistemi di AM nel 2016

Per ciò che concerne i campi applicativi attuali, è evidente che la fabbricazione additiva si presenti in modo preponderante nei settori industriali, aerospaziali ed automotive, che cumulativamente superano il 50%. Tuttavia i campi di applicazione si estendono anche ai settori: medicale/dentale, in particolar modo nell'ambito delle protesi personalizzate, di produzione di componenti elettronici, senza escludere il ramo relativo alla ricerca accademica e militare. [2]

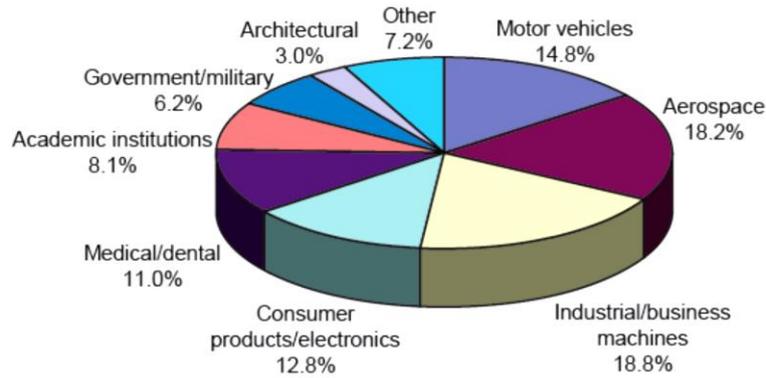


Figura 6: Settori di impiego dell'AM

I settori che maggiormente beneficiano dell'additive manufacturing sono quelli in cui è prevalente la possibilità e la necessità di personalizzazione del componente e nei casi in cui non si hanno elevati volumi produttivi, come si evince dalla Figura 7, che mette in luce la distinzione e la convenienza economica di un componente prodotto con Laser Beam Melting piuttosto che con una tecnologia tradizionale. [3]

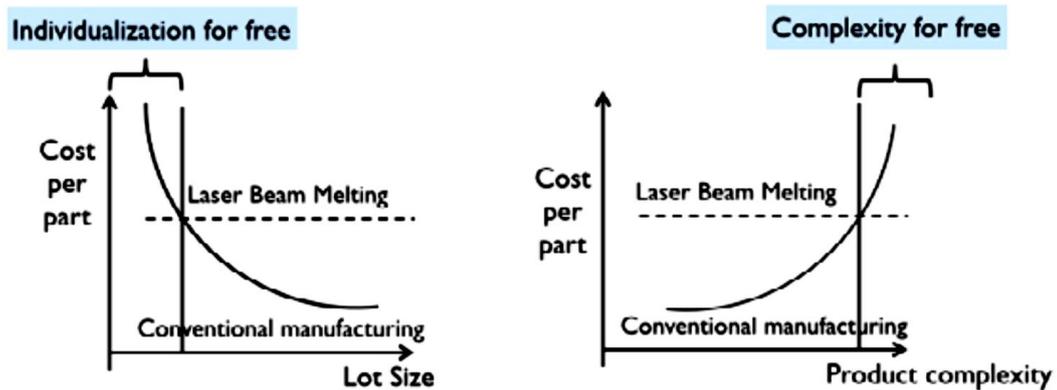


Figura 7: Traditional Manufacturing Vs Additive Manufacturing [3]

In questo ambito si sente spesso parlare di "Individualization for free", proprio per evidenziare come un lotto a basso volume produttivo, o per prodotti personalizzati di cui se ne produce un esemplare, convenga l'impiego dell'AM, perché in quel caso la tecnologia tradizionale avrà un costo nettamente superiore, situazione che invece si capovolge all'aumentare della grandezza del lotto.

Altro elemento chiave è la cosiddetta "Complexity for free", all'aumentare della complessità del componente da produrre, nel caso del manufacturing convenzionale, il costo cresce, mentre per il Laser Beam Melting resta pressoché costante, di conseguenza si può individuare il punto oltre il quale diventa economicamente vantaggioso l'utilizzo delle tecniche additive,

ovvero per valori di complessità geometrica maggiori. [3] È da sottolineare che, nel caso di una tecnica a letto di polvere come il Laser Beam Melting, si tratta di un'approssimazione un costo costante per complessità molto elevate, dal momento che entrano in gioco altri fattori come: la quantità eccessiva di supporti, che rappresentano materiale di scarto, la loro difficoltà nella rimozione, che comporta ore di lavoro in più o l'impossibilità di far evacuare la polvere.

Il grafico in Figura 8 mostra come, nonostante la fabbricazione additiva sia nata per soddisfare le esigenze di realizzazione di prototipi nel minor tempo possibile, oggi essa è ampiamente impiegata anche nella produzione di parti funzionali, vantando il 33.8% dei componenti prodotti in AM, tuttavia in tal caso risulta di fondamentale importanza una progettazione dedicata per l'additive manufacturing, si parla di DFAM Design For Additive Manufacturing. Tra le altre applicazioni notiamo: stampi per i processi di fonderia (Rapid Casting), prodotti già assemblati e diverse tipologie di prototipi.

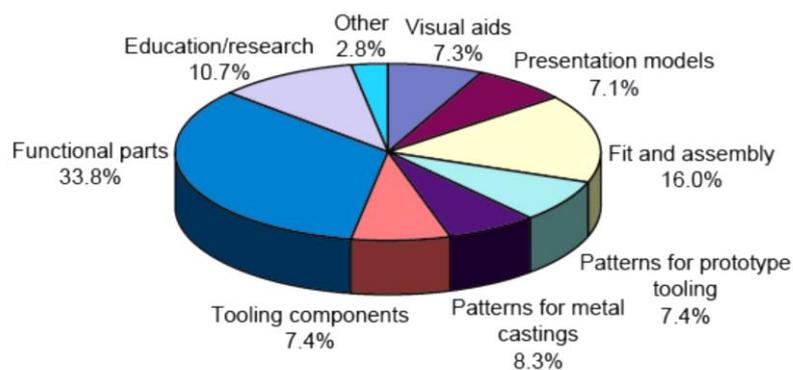


Figura 8: Uso dei componenti prodotti in AM [2]

La realizzazione di prototipi continua ad essere, ancora oggi, l'applicazione più diffusa per la fabbricazione additiva. Durante lo sviluppo di un prodotto possono essere creati diversi tipi di prototipi:

- Concettuali, impiegati per valutare la forma, verificare il montaggio o analizzare le difficoltà tecnologiche, il materiale in questo caso non è importante ai fini del prototipo stesso e può essere uno qualunque;
- Funzionali, in questo caso vengono valutate le prestazioni del componente con prove funzionali o si cerca di ottimizzare il prodotto per la funzione, quindi il materiale deve essere simile a quello dell'oggetto finale;
- Tecnici, sono prototipi in cui si valutano le prestazioni del prodotto e del ciclo di fabbricazione, cercando di ottimizzarlo, quindi si segue una tecnologia di produzione

quanto più aderente a quella reale ed il materiale che sostituisce il prototipo deve essere molto simile a quello del componente da realizzare;

- Pre-serie, sono realizzati in materiali e mediante tecnologie di fabbricazione definitive, per cui sono ammesse modifiche marginali.

Nel caso di grandi volumi di produzione l'AM entra in gioco principalmente nella fase sviluppo prodotto con i prototipi concettuali e funzionali, mentre per produzioni limitate e di nicchia, come potrebbero essere quelle inerenti l'aerospace ed il racing, rientra in tutte le categorie prototipi sopra esposti e nella fase di produzione del prodotto definitivo.

In Figura 9 è messa in evidenza la percentuale dei costi in funzione delle fasi di sviluppo del prodotto e del corrispondente tipo di prototipo necessario. Il budget viene impegnato al 70% nelle prime due fasi di sviluppo prodotto, tuttavia la spesa si ha a valle dei prototipi funzionali, ciò rappresenta un grande vantaggio in quanto viene concessa la possibilità di sbagliare e provare diverse soluzioni senza incorrere in costi eccessivi. Grazie all'additive manufacturing però si ha l'ulteriore vantaggio di accelerare le prime fasi di individuazione degli errori e di prova delle varie alternative senza gli investimenti per la produzione delle attrezzature necessarie alla realizzazione dei prototipi.

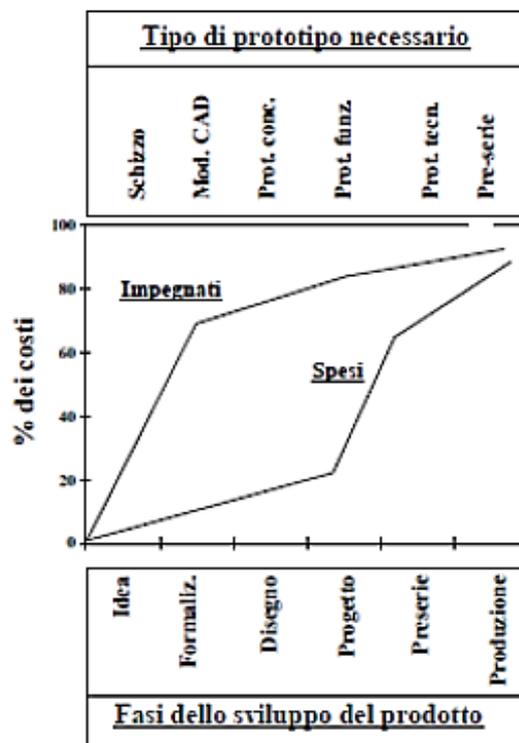


Figura 9: % dei costi in funzione delle fasi di sviluppo e del tipo di prototipo [2]

Negli ultimi anni le esigenze del mercato sono mutate, si è assistito progressivamente ad un incremento del numero di varianti prodotte per uno stesso componente e ad un decremento del tempo di vita, inteso come tempo di permanenza del prodotto sul mercato, di conseguenza è diminuito il tempo che le aziende hanno per ammortizzare l'investimento iniziale. Parallelamente si è verificato un aumento della complessità degli articoli ed una riduzione dei tempi di consegna, divenendo i time-to-market sempre più stringenti, come raffigurato in Figura 10. [2]

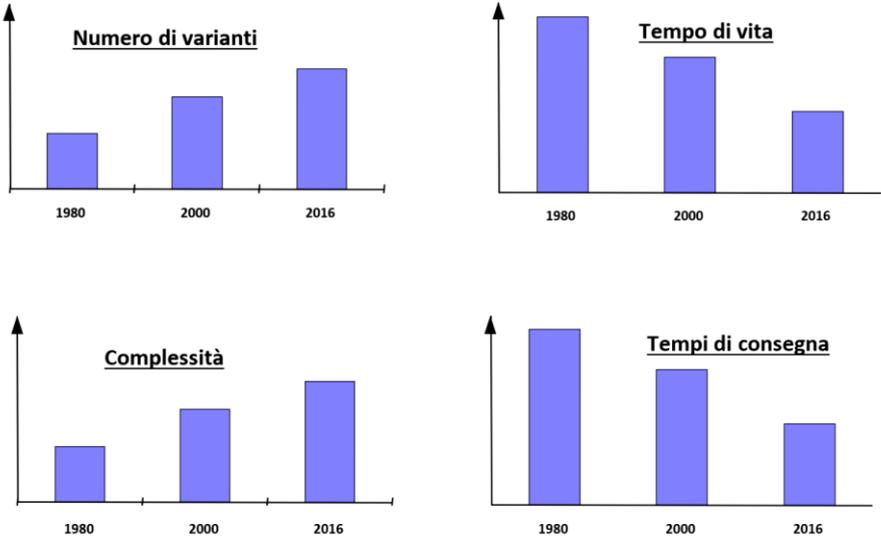


Figura 10: Cambiamenti del mercato in relazione al numero di varianti, al tempo di vita, alla complessità e ai tempi di consegna.

Si ha quindi l'esigenza di sviluppare i prodotti sempre più in fretta e di possedere un know-how che permetta la progettazione e realizzazione di un prodotto nel minor tempo possibile, prerogativa dell'additive manufacturing.

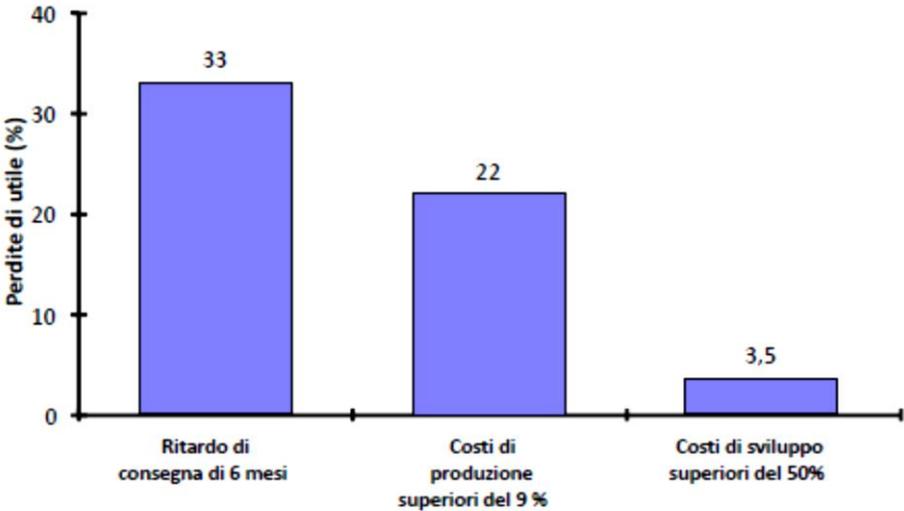


Figura 11: Percentuale di perdita di utile

In Figura 11 è rappresentata la perdita di utile, in percentuale, in tre differenti casi:

1. Ritardo di consegna di 6 mesi;
2. Aumento del 9% dei costi di produzioni;
3. Aumento del 50% dei costi di sviluppo.

È evidente quanto sia impattante un ritardo nella consegna e nell'inserimento nel mercato di un prodotto finito, ciò trova giustificazione nel fatto che chi presenta prima il prodotto stabilisce il prezzo di vendita. Chi arriva in ritardo, invece, si dovrà adeguare al prezzo imposto dai competitors incorrendo quindi in una perdita di utile importante, si stima che per un ritardo di 6 mesi si verifica un -33% sull'utile.

Un'altra possibile causa di perdita potrebbe essere un aumento del costo di produzione, nel caso in cui si è commesso un errore in fase di sviluppo, il grafico mostra come un incremento del 9% dei costi di produzione si ripercuota con un 22% sulle perdite.[2]

È interessante notare invece come un incremento anche sostanziale dei costi in ricerca e sviluppo, il 50% in più, porti ad una perdita di utile irrisoria se paragonata ai casi precedenti. Risulta conveniente investire nel settore R&D, soprattutto per i vantaggi sul lungo termine, come l'essere più competitivi, il riconoscere prima gli errori che potrebbero sorgere, evitando di incappare nelle altre cause di perdita sicuramente più dannose.

L'additive manufacturing ha semplificato notevolmente la supply chain tradizionale, promuovendo una logica pull con una produzione distribuita, con l'assenza di magazzini e la fabbricazione nel punto di richiesta, con conseguenti ridotti lead times.

Da un punto di vista della sostenibilità economica ed ambientale, la fabbricazione additiva consente:

- Ridotto consumo delle materie prime, con un'ottimizzazione dell'efficienza del prodotto, grazie anche alla possibilità di creare strutture alleggerite;
- Ridotto impiego di attrezzature, essendo necessarie principalmente le stampanti 3D;
- Scorte ridotte;
- Supply chain efficiente, con modelli di vendita al dettaglio;
- La quasi assenza del trasporto del prodotto finito, con conseguente diminuzione delle emissioni inquinanti.

In definitiva le principali peculiarità dell'additive manufacturing, ossia la possibilità di realizzare in un'unica lavorazione un oggetto geometricamente e funzionalmente complesso e la tendenza all'ottimizzazione della quantità di materiale impiegato, hanno un ridotto impatto sull'ambiente e sui costi di produzione.

Oltre agli aspetti positivi, è da sottolineare che alcuni materiali di partenza per questa tecnologia, possono rappresentare un rischio tossicologico per il lavoratore. Basti pensare alle polveri metalliche, che devono essere conservate adeguatamente per evitare che a contatto con l'ossigeno dell'aria possano reagire e provocare incendi, allo stesso tempo il lavoratore deve impiegare correttamente i dispositivi di protezione individuale per non inalare tali polveri. Anche per le resine liquide bisogna prestare notevolmente attenzione, trattandosi di materiali notoriamente tossici.

In conclusione possiamo affermare che c'è un trend positivo relativamente alle installazioni di sistemi per l'AM, anche se ancora in modo molto disomogeneo all'interno del mercato mondiale, ci si aspetta un'ulteriore diffusione di tale tecnologia e con essa una riduzione del costo dei materiali di partenza, in particolar modo le polveri che devono essere realizzate con caratteristiche particolarmente stringenti. Le applicazioni riguardano ancora in modo preponderante la realizzazione di prototipi, anche se si attende un incremento per quel che concerne la produzione di parti funzionali, insieme con l'evoluzione ed il miglioramento dei processi produttivi di AM.

Infine ricordiamo che la fabbricazione additiva consente di ridurre tempi e costi di sviluppo prodotto, sia per la fase di progettazione che per quella di produzione, avendo il vantaggio di non necessitare investimenti per ulteriori attrezzature. Ad oggi si può notare che, l'incidenza maggiore sul costo del prodotto è rappresentato dall'investimento iniziale per l'acquisto della macchina, per il futuro ci si augura una diminuzione di tale costo, con il progressivo diffondersi delle tecnologie di AM, oppure un incremento della produttività di tali macchine che potrebbe compensare l'onere iniziale particolarmente dispendioso.

1.1.3 Vantaggi e svantaggi

I vantaggi e gli svantaggi dell'additive manufacturing sono capitalizzabili nel momento in cui il componente da realizzare, viene progettato seguendo le regole del Design For Additive Manufacturing (DFAM). In pratica, è possibile parlare dei benefici e dei problemi dell'AM, solo

se il componente è pensato per essere prodotto con le tecniche di fabbricazione additiva e non intendere tali tecnologie come un metodo alternativo alle lavorazioni convenzionali. Tale ragionamento non è nato appositamente per l'additive manufacturing, ma si tratta di un concetto standard pensato anche per le tecniche tradizionali, di fatti non avrebbe senso effettuare la progettazione di un oggetto per realizzarlo in una determinata lavorazione, ad esempio la fresatura, e poi discutere sui vantaggi e sugli svantaggi di produrre lo stesso componente ma con un'altra tecnica.

Possiamo racchiudere i vantaggi fondamentali della fabbricazione additiva in tre concetti chiave:

1. Migliorare le performance del componente;
2. Ridurne il peso;
3. Ridurre tempi e costi di sviluppo prodotto.

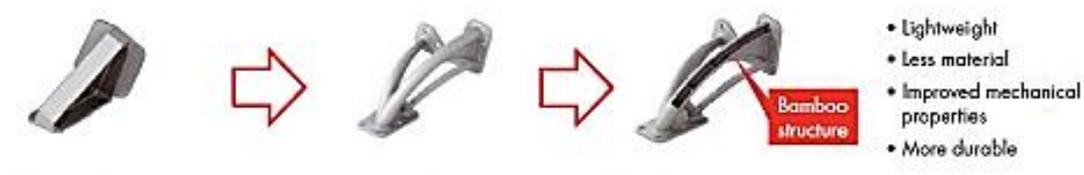


Figura 12: Processo di re-design e vantaggi [2]

È logico che se si deve effettuare una riprogettazione per l'AM di un componente qualsiasi, in primis si deve pensare in un'ottica volta al miglioramento funzionale del componente stesso. Un altro potente strumento a servizio della fabbricazione additiva è l'ottimizzazione topologica, cioè porre il materiale solo dove necessariamente serve, con conseguente riduzione del peso del componente. Tale metodo comporta un duplice beneficio: si riscontra una riduzione del costo del componente, dovuto al minor quantitativo di materiale impiegato; inoltre se si sta progettando un oggetto che è montato su veicoli terrestri, aerei o spaziali, che risulta più leggero, si verificherà un risparmio sul carburante spesso significativo.

Il terzo vantaggio è stato precedentemente discusso e vale soprattutto nel caso di lotti produttivi non particolarmente grandi e per i quali sono necessarie attrezzature particolari e costose.

In generale i vantaggi e gli svantaggi della fabbricazione additiva possono essere distinti in funzione del prodotto e del processo.

Relativamente il processo i benefici sono:

- Flessibilità, con una sola macchina è possibile creare forme illimitate;
- Assenza di attrezzature e di dispositivi di bloccaggio;
- Sottosquadri ammessi;
- Un unico step produttivo, cui segue eventuale trattamento termico e post-processing;
- Macchine a basso presidio;
- Tempi e costi legati solo alle dimensioni e non alla complessità geometrica del componente.

I limiti del processo invece riguardano:

- Volumi di lavoro modesti, con conseguente limite sulle dimensioni del componente finale;
- Velocità di costruzione contenute;
- Carezza di controllo real time sul processo ed impossibilità di modifiche retroattive;
- Materiali disponibili in funzione della macchina e del tipo di processo;
- Macchine nate per la prototipazione, con bassa automazione;
- Investimento iniziale per l'acquisto della macchina importante;
- Alto livello di know-how.

Per il prodotto si possono individuare i seguenti vantaggi:

- Libertà di progettazione per il progettista;
- Strutture leggere, è possibile creare strutture lattice e forme cave complesse;
- Parti integrate, soprattutto per i polimeri;
- Design ergonomico;
- Personalizzazione.

Gli svantaggi inerenti il prodotto sono:

- Necessità dei supporti, soprattutto per i componenti metallici;
- Bassa finitura superficiale;
- Numero limitato di materiali che possono essere impiegati;
- Costo elevato dei materiali, in particolar modo le polveri metalliche.

Le aspettative per il futuro riguardano principalmente un miglioramento del processo produttivo che consiste nell'aumento: della velocità di stampa, del volume delle camere di lavoro, dell'automazione e del monitoraggio del processo con la possibilità di interventi;

l'ottimizzazione della strategia di costruzione; la diminuzione del prezzo delle polveri e dei componenti finiti; la realizzazione di specifiche di certificazione che garantiscano la qualità, l'affidabilità e la ripetibilità di tutti i prodotti.

1.1.4 Tecniche di fabbricazione additiva e materiali

Una prima classificazione sull'ampio panorama delle tecnologie di fabbricazione additiva esistenti, si può effettuare distinguendo la materia prima di partenza, che può essere sotto forma di polvere, liquido o solido, come mostrato in Figura 13.

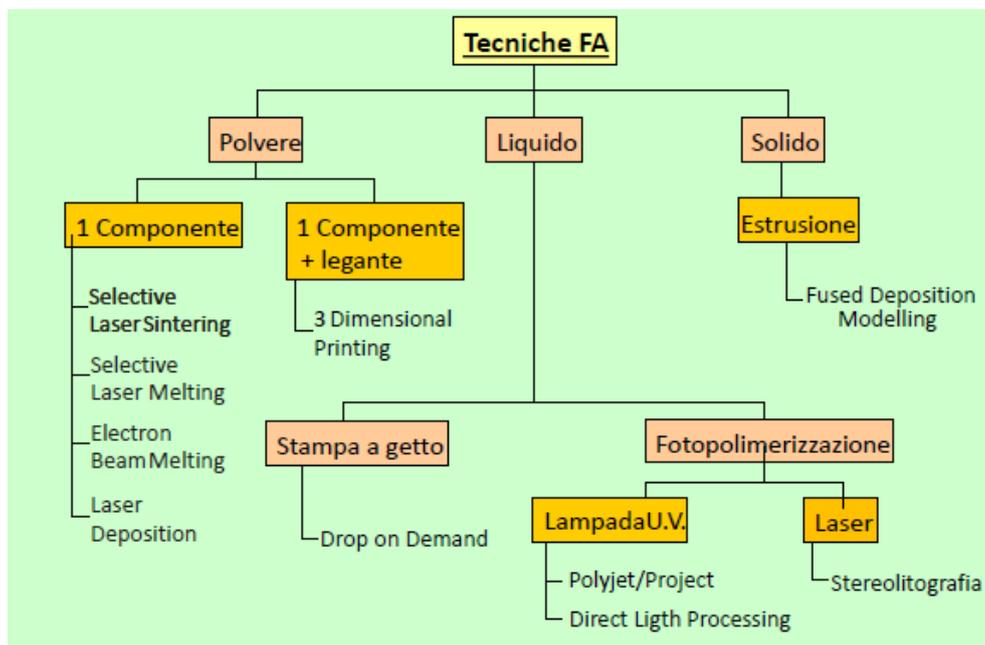


Figura 13: Classificazione tecniche di fabbricazione additiva [2]

Da un punto di vista cronologico sono apparse per prime le tecniche basate sui polimeri liquidi, che utilizzano la fotopolimerizzazione, si ha una resina liquida (fotopolimero) che viene solidificata per effetto di una radiazione che può essere laser o UV, quindi l'indurente è il fotone. Con il laser si ha la stereolitografia, la più conosciuta e la prima apparsa sul mercato, con l'UV si hanno i processi Polyjet/Project o Direct Light Projection. Sempre partendo da liquido è possibile usare una testina di stampa che deposita il materiale del pezzo mediante la tecnica della stampa a getto, Drop on Demand. Con tali tecniche non si riescono ad ottenere componenti nei materiali definitivi, al limite si arriva a realizzare prototipi funzionali.

Nel caso di materiale sotto forma di polvere si può distinguere tra il caso di un solo componente, in cui si trasforma la polvere in solido attraverso una sorgente laser o a fascio di elettroni: Selective Laser Melting, Electron Beam Melting, Laser Deposition; oppure vi è il caso

di un componente e il legante, in cui si ha una testina che deposita il legante sul letto di polvere per generare il pezzo allo stato solido, in questo caso si parla di 3 Dimensional Printing. La famiglia delle tecniche che impiegano una polvere monocomponente, aggregata da una sorgente termica, è al momento l'unica tecnologia che permette di ottenere componenti definitivi partendo da polvere, invece la seconda famiglia non potendo garantire il materiale definitivo viene principalmente impiegata per la creazione di prototipi.

Infine la tecnica che parte da materiale allo stato solido, è basata sul processo di estrusione e si chiama Fused Deposition Modelling. Essa garantisce applicazioni di prototipazione funzionale e potenzialmente di produzione definitiva.

Un'altra classificazione più dettagliata può essere effettuata sulla base della famiglia di materiale impiegato:

- Metalli;
- Polimeri;
- Ceramiche.

1.1.5 Tecniche di fabbricazione additiva per i metalli

Le tecniche per i materiali metallici sono riassunte nello schema di Figura 14.[2]

Per le tecnologie a letto di polvere rimandiamo al paragrafo dedicato, mentre adesso faremo un focus sulle altre metodologie, ossia Laser Deposition ed Electron Beam Additive Manufacturing.

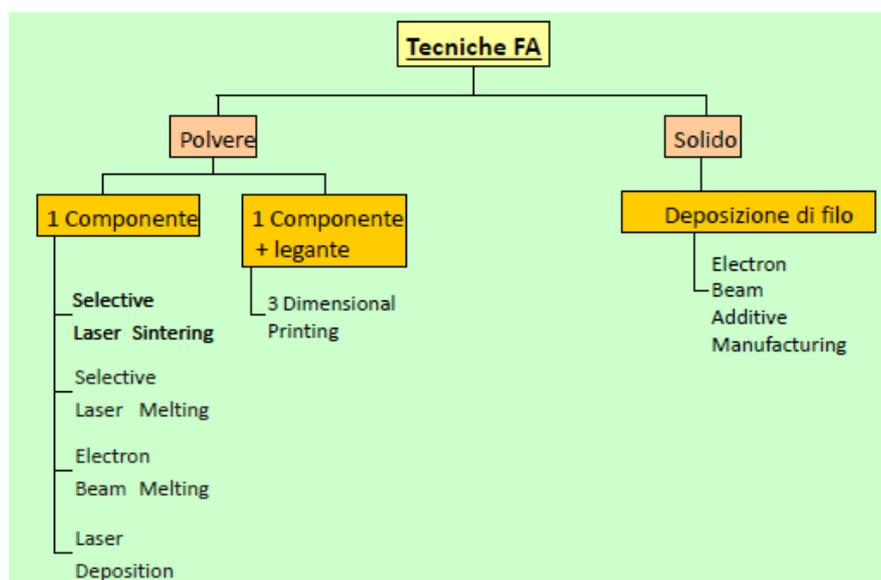


Figura 14: Tecniche AM per i metalli

1.1.6 Laser Deposition

La laser deposition è una tecnica che deriva dal “laser cladding” impiegata per la deposizione di rivestimenti o per la riparazione di componenti usurati, la deposizione di polvere laser oggi è usata per la fabbricazione additiva di oggetti definitivi. Concettualmente è semplice, come raffigurato in Figura 15, si tratta di una macchina a 5 assi che al posto dell’utensile presenta la sorgente laser e uno o più ugelli che adducono la polvere nel punto di focalizzazione del laser, quest’ultimo provvede alla fusione della polvere e alla sua deposizione strato su strato.

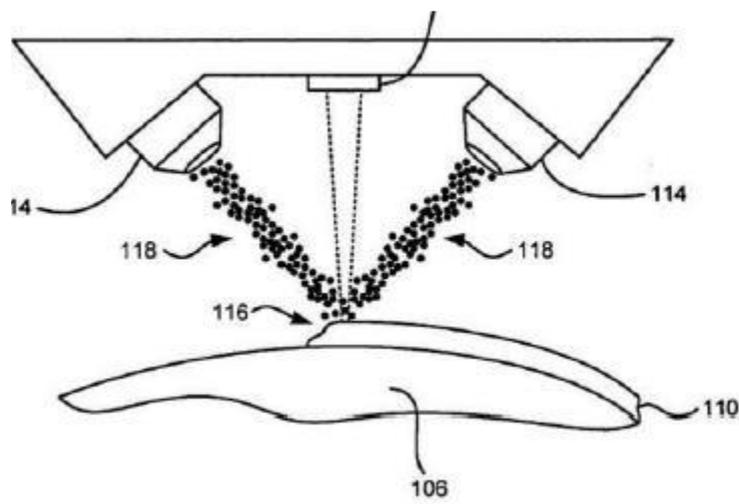


Figura 15: Laser Deposition [2]

Tra i vantaggi di tale tecnica si ricorda:

1. Possibilità di creare componenti di dimensioni molto grandi in quanto si ha una deposizione e fusione localizzata in un punto, quindi potenzialmente non si hanno limiti;
2. Realizzazione della lega in macchina, usando due ugelli con due metalli diversi;
3. Possibilità di cambiare materiale agevolmente, senza problemi di pulizia e contaminazione;
4. Creazione di componenti multi materiale, infatti è possibile depositare strati di metalli differenti;

I limiti di questa tecnologia si esplicano in:

1. Vincoli sulla geometria realizzabile, perché mancano i supporti;
2. Estrema complessità sul controllo del processo, non essendoci un sistema di monitoraggio che garantisca la qualità dello strato deposto;
3. Necessità di un gas di copertura per evitare contaminazione ed ossidazioni;

4. Necessità di finitura alle macchine utensili, la qualità superficiale è scarsa.

Il processo è particolarmente lento, per permettere al gas di copertura di esplicare la sua funzione ed evitare quindi l'ossidazione, localmente si riesce, tuttavia nel momento in cui la lavorazione procede la parte deposta più calda in parte reagirà con l'atmosfera producendo scoria. Continuando la costruzione strato su strato la scoria, più leggera, risale per via della rifusione parziale dello strato precedente, quindi in teoria tra gli strati non si avranno difetti e l'adesione tra di essi sarà garantita.

Per ciò che concerne i materiali, potenzialmente tutte le leghe saldabili possono essere impiegate in questa tecnica, i più diffusi sono: lega di alluminio, Cobalto Cromo per applicazioni biomedicali, motorsport e aerospazio, acciaio per stampi ed inox, la lega Ti6Al4V, l'Inconel 718 e IN625.

1.1.7 Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM)

È l'unica tecnica per i metalli in cui si parte da materiale allo stato solido sotto forma di un filo, che viene fuso mediante un fascio di elettroni. È una tecnica poco diffusa perché è richiesto un vuoto molto spinto difficile da realizzare e mantenere, potrebbe invece trovare un interessante impiego nella creazione di componenti nello spazio, anche perché sarebbe impossibile gestire le polveri.

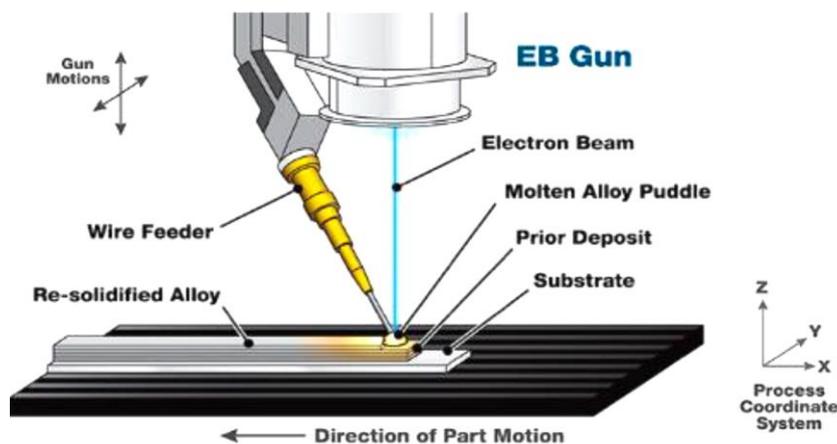


Figura 16: Electron Beam Additive Manufacturing [2]

Si alimenta il filo con un certa velocità mentre il cannone emette il fascio di elettroni che porta a fusione il metallo depositandolo. Sorgente e filo sono solidali tra loro ed inseriti nella stessa testa di lavoro che può muoversi lungo gli assi x,y e z, la piattaforma di costruzione invece è fissa e su di essa prenderà forma il componente.

Si tratta sostanzialmente di un processo di saldatura, però sottovuoto, il che comporta minori rischi di difetti e maggiore facilità nella creazione degli strati, quindi un componente che dal punto di vista metallurgico è ottimale.

La capacità di deposizione attuale è molto elevata, è compresa tra 3 e 9 kg/h, tuttavia si sacrifica un po' la qualità, le tolleranze e la rugosità del componente, è possibile quindi ottenere oggetti di grandi dimensioni in poco tempo, ma è chiaro che poi si debbano effettuare successive lavorazioni meccaniche di finitura. Depositando cordoni spessi, i particolari risultano notevolmente grossolani e necessitano lavorazioni all'utensile, perché è possibile vedere macroscopicamente i vari strati depositi, in Figura 17 alcuni esempi.

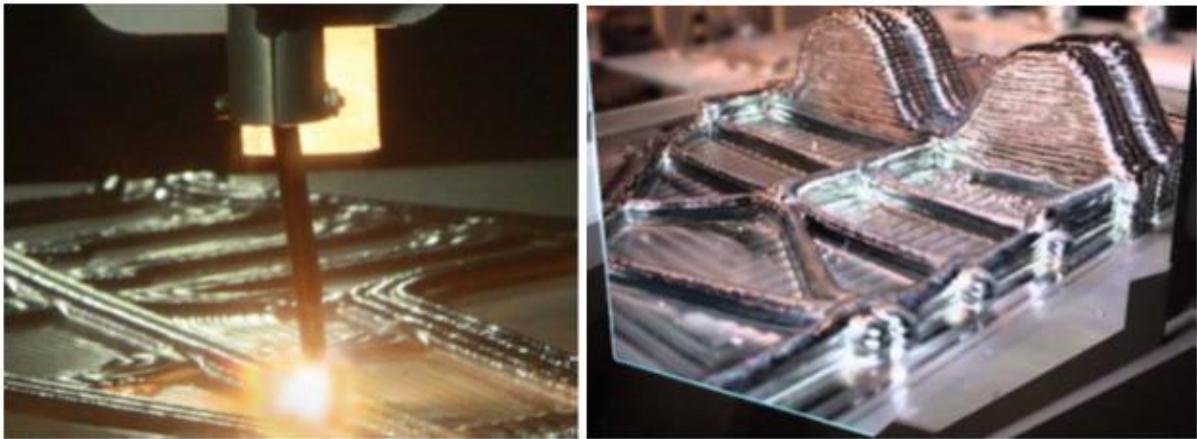


Figura 17: Esempi di componenti prodotti in EBAM [2]

Le applicazioni principali prevedono la realizzazione di semilavorati di grandi dimensioni e componenti multi materiale, perché è possibile utilizzare due filamenti metallici diversi. Il vantaggio di questa tecnica, sulle lavorazioni convenzionali, sta nella riduzione dello spreco di materiale, infatti se si dovesse partire da un blocco e fresare, gli scarti di leghe a volte molto costose è di circa l'80%, mentre con l'EBAM si stimano intorno al 10%. [2]

I materiali più adatti sono quelli saldabili, come: leghe di alluminio, acciaio inossidabile, leghe rame-nichel, titanio e sue leghe, tantalio, niobio, tungsteno; non è possibile usare materiali basso fondenti, in quanto evaporerebbero per via delle temperature troppo elevate generate dal fascio di elettroni.

Nonostante l'elevata produttività e gli ampi volumi di lavoro tale tecnica trova difficoltà nella gestione dell'impianto, che presenta un volume di lavoro molto grande all'interno del quale si

deve generare un vuoto molto spinto, al fine di permettere al fascio di elettroni di lavorare adeguatamente.

1.1.8 Tecniche di fabbricazione additiva per i polimeri

Le tecniche di AM per i polimeri sono le primissime ad essere comparse sul mercato, con la stereolitografia che ha fatto da apripista. In Figura 18 sono schematizzate le principali tecniche AM per i materiali polimerici.

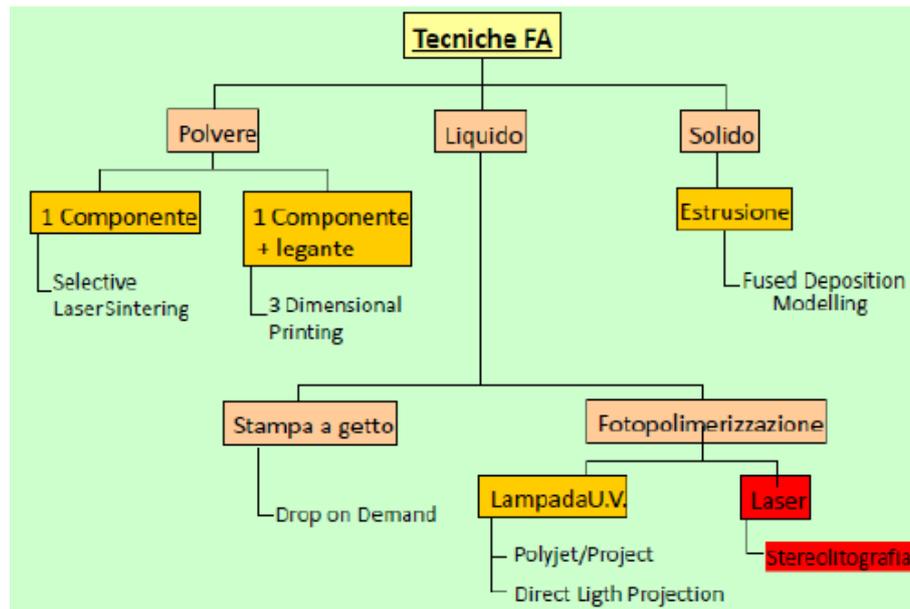


Figura 18: Tecniche AM per i polimeri [2]

A parte le tecniche basate sul processo di fotopolimerizzazione, che fanno uso di resine termoindurenti, le altre impiegano polimeri termoplastici.

Analogamente alle tecnologie tradizionali di produzione dei materiali polimerici, le tolleranze che si ottengono, con i processi di additive manufacturing, sono confrontabili ed i prodotti non possono essere lavorati alle macchine utensili, tuttavia si può effettuare una finitura superficiale manuale con la tela abrasiva ed è possibile estetizzare i componenti mediante verniciatura.

Il campo principale di applicazione è quello relativo ai prototipi concettuali e funzionali.

1.1.9 Stereolitografia

Il materiale impiegato per la stereolitografia prende il nome di fotopolimero, si tratta di una resina termoindurente che può avere base epossidica, acrilica o vinilica, non è riutilizzabile a

fine vita, a differenza dei termoplastici, per questo motivo la stereolitografia è adatta solo per prototipi e non per la produzione.

Il processo consta di due fasi:

1. Trattamento con laser che porta alla formazione di una green-part, componente a basse prestazioni della geometria definitiva;
2. Post-trattamento in forno UV che consolida la parte dando origine al componente finito.

La prima fase è mostrata in Figura 19 [2]:

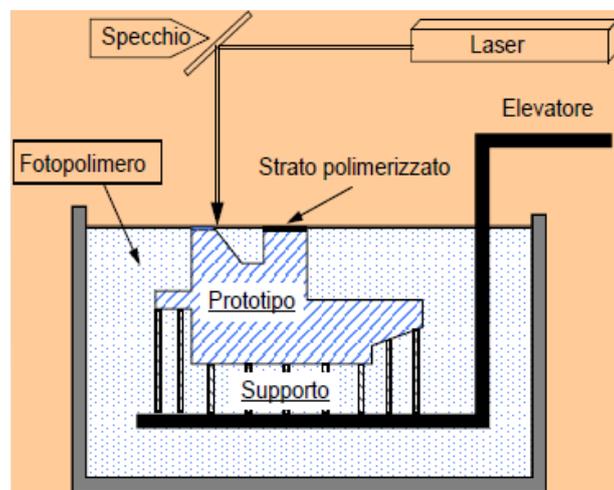


Figura 19: Prima fase del processo di stereolitografia per generare la green-part

Il fotopolimero allo stato liquido, avente densità di poco superiore all'acqua, è contenuto in una vasca, all'interno della quale è presente un elevatore che si può muovere lungo l'asse z. Sul pelo libero è presente una racla che invece si muove orizzontalmente che serve a livellare il liquido. In alto invece si ha la sorgente laser fissa ed un sistema di specchi che si muove al fine di deviare il fascio.

Inizialmente l'elevatore si trova ad un layer dal pelo libero, la sorgente laser è focalizzata e costruisce il primo strato, poi l'elevatore scende di un altro strato ed entra in gioco nuovamente il laser per formare la sezione successiva e ripetere il processo

Completato l'ultimo strato, l'elevatore sale e viene fuori il componente che può essere estratto dalla piattaforma, come si può osservare in Figura 20. [2]



Figura 20: Green-part sulla piattaforma di costruzione

Il processo fin qui è simile alle tecniche a letto di polvere, tuttavia a differenza di quest'ultime, il laser non solidifica l'intera sezione, ma il contorno esterno e alcune linee di collegamento, in modo da intrappolare all'interno del liquido, che verrà poi solidificato nella fase successiva, questo accorgimento serve a velocizzare la fase di costruzione. La green-part quindi viene estratta dalla piattaforma, si rimuovono i supporti, che servono a sostenere eventuali parti sporgenti e ad evitare che si deformino, e viene processata in un forno con lampade UV che completano la solidificazione in poco tempo.

Sono numerosi i parametri che possono influenzare la qualità del pezzo finale:

1. La preparazione dei dati, quindi l'orientamento di costruzione, lo slicing ed i supporti;
2. La geometria, intesa come dimensioni, componente massivo o cavo;
3. L'ambiente di lavoro: temperatura, umidità e vibrazioni;
4. Il materiale, cioè le proprietà meccaniche, fisiche e chimiche;
5. Il tipo di macchina: potenza del laser, il suo spot che influenza la capacità di replicare i dettagli, la precisione dell'elevatore;
6. Il processo e tutti i parametri ad esso legati: spessore dello strato, velocità di scansione, strategia di scansione, l'hatch;
7. Post-processo: pulizia, finitura e post-trattamento.

La stereolitografia è la tecnica più precisa tra tutte quelle relative ai polimeri, con le migliori performance in termini di tolleranze e rugosità raggiungibili, ciò è dovuto al fatto che si parte da un liquido, un mezzo continuo, e non si è influenzati dalle condizioni della polvere né dalle dimensioni del filo.

La stereolitografia è la tecnica più usata per la prototipazione rapida funzionale, accanto ad essa si producono anche modelli a perdere per la microfusione (quick cast), modelli di stile, modelli per la replicazione siliconica, modelli per prove di montaggio.

Tra i vantaggi di tale tecnica ricordiamo:

- È la tecnica che assicura le migliori performance dal punto di vista delle tolleranze dimensionali e di rugosità superficiale;
- Permette la realizzazione di elementi traslucidi o trasparenti;
- Lo spessore dei layer è molto piccolo per privilegiare le tolleranze;
- Possibilità di impiego per il ciclo di microfusione con la soluzione del quick cast.

I limiti della stereolitografia sono invece:

- I materiali termoindurenti che precludono la produzione di massa;
- Impossibilità di sfruttare tutto il volume di lavoro, perché non si possono sovrapporre i pezzi (nesting);
- Supporti realizzati nello stesso materiale del componente definitivo e che devono essere rimossi meccanicamente;
- Le macchine lavorano con vasca piena, quindi l'investimento sul materiale non è banale;
- Gestione del fotopolimero liquido, che è tossico e che deve stare a riparo da fonti di luce ultravioletta;
- Effetto del ritiro del polimero a seguito della solidificazione, che genera un tensionamento residuo.

1.1.10 Polyjet/Project

Si tratta di due tecniche di fotopolimerizzazione, praticamente uguali, ma sviluppate da due case produttive differenti: l'Objet Geometries, assorbita poi da Stratasys, e 3D Systems.

A differenza della stereolitografia non si ha la vasca con il fotopolimero, ma si effettua una deposizione, mediante una testina di stampa multi ugello, con contemporanea solidificazione per mezzo di lampade UV, evitando di lavorare con la resina allo stato liquido.

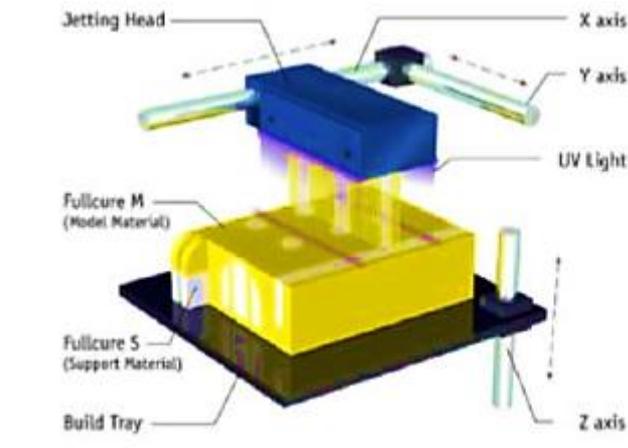


Figura 21: Processo Polyjet/Project [2]

La testina può muoversi in avanti e indietro lungo l'asse x e, nel caso Polyjet, è preceduta e seguita da due lampade UV, che provvedono alla solidificazione immediata dello strato e che si attivano una alla volta in funzione della direzione di avanzamento della testina. Per la tecnica Project invece, l'unica differenza consiste nella presenza di un sola lampada UV. La piattaforma scende muovendosi lungo l'asse z consentendo la crescita del componente, come per la maggior parte delle tecniche di fabbricazione additiva.

Grazie alla testina multi ugello il componente definitivo ed i supporti vengono depositi con due fotopolimeri differenti, in particolar modo quello relativo ai supporti è solubile in acqua, al fine di facilitare la rimozione degli stessi, mentre per il pezzo si usa una resina termoindurente su base epossidica.

Rispetto alla stereolitografia si possono individuare diversi vantaggi:

1. Cartucce stagne che contengono il fotopolimero, così l'operatore non entra in contatto con il fotopolimero allo stato liquido, eludendo anche tutti i problemi connessi alla sua gestione;
2. Possibilità di produrre componenti in multi materiale, aggiungendo più testine si possono ad esempio creare parti più rigide e parti flessibili, è permessa la deposizione simultanea di massimo tre materiali per il componente ed uno per il supporto. Si parla anche di materiale digitale: un composito ottenuto dalla combinazione diretta in macchina di più materiali, con caratteristiche intermedie e modulabili rispetto i materiali di partenza.
3. Possibilità di stampare a colori, grande vantaggio da sfruttare soprattutto per la realizzazione dei prototipi concettuali.

Per quanto riguarda le applicazioni, sono simili alla stereolitografia, anche se Polyjet è meno precisa e si ottiene un componente con una rugosità superficiale maggiore, inoltre la risoluzione per le macchine si esprime in DPI (dots per inch), che è l'unità di misura della risoluzione per le immagini.

Un'applicazione tipica di questa tecnologia è relativa alla realizzazione di modelli realistici per replicazione anatomica, che servono per la pianificazione degli interventi chirurgici molto particolari e delicati, oppure in ambito dentale, per riprodurre il simulacro della bocca dei pazienti, senza realizzare l'impronta ed il calco in gesso, grazie allo sviluppo dello scanner intra-orale.

In generale possiamo riassumere i vantaggi del processo Polyjet/Project in:

- Buone prestazioni in termini di tolleranze dimensionali e rugosità superficiali, anche se inferiori alla stereolitografia;
- Possibilità di creare componenti trasparenti o traslucidi;
- Assenza di post-trattamento;
- Supporti solubili in soluzione acquosa;
- Fotopolimero in cartucce stagne che ne evita il contatto;
- Assenza di vincoli per l'installazione, perché non si c'è la vasca contenente il fotopolimero.

I limiti invece sono sostanzialmente:

- Deposizione discreta;
- Il polimero termoindurente, non riciclabile;
- Impossibilità di sfruttare in altezza il volume di lavoro, non si può realizzare il cosiddetto nesting.

1.1.11 Direct Light Projection

È l'ultima tecnica di fabbricazione additiva che impiega come processo di solidificazione la fotopolimerizzazione. Il materiale è sempre il fotopolimero, viene impiegato lo stesso per la costruzione del pezzo e dei supporti, con necessità di rimozione meccanica di quest'ultimi.

Il processo consiste nella solidificazione del fotopolimero liquido, mediante un fascio UV emesso da un proiettore. Si verifica un'illuminazione e conseguente solidificazione di tutta la sezione contemporaneamente, quindi un tempo di costruzione inferiore rispetto la

stereolitografia o il polyjet/project, in quanto in pochi secondi si riesce a trattare l'intera sezione.

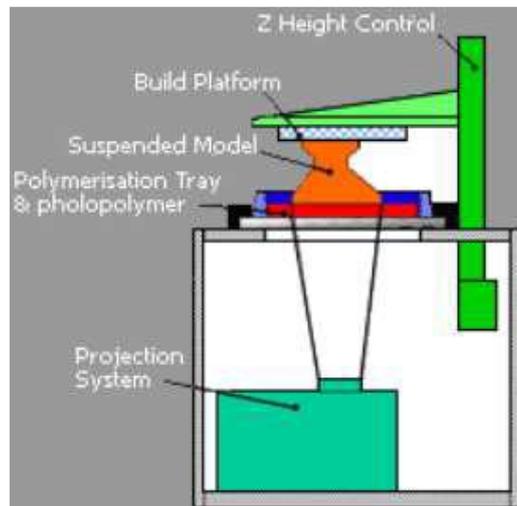


Figura 22: processo Direct Light Projection

In Figura 22 si può osservare la configurazione più diffusa per questa tecnica AM, con il proiettore posto in basso e la piattaforma di costruzione che si muove lungo l'asse z ma verso l'alto, a differenza di tutti gli altri processi. Il componente alla fine si troverà ancorato alla piattaforma e capovolto in giù, ciò spiega perché questa tecnica è adatta per pezzi di piccole dimensioni. Un altro motivo è dovuto al fatto che il proiettore emette da una certa distanza, quindi il fascio tende a divergere, allora per garantire la stessa quantità di energia in tutta la sezione è bene che essa sia piccola, infatti maggiore l'area più il proiettore deve essere potente per evitare di sottoesporre la parte laterale rispetto quella centrale. [2]

Il polimero allo stato liquido è contenuto in una vasca, ma non è piena come il caso della stereolitografia, si riempie solo con il quantitativo strettamente necessario per la produzione del componente, che sarà quindi funzione dell'altezza di quest'ultimo. Ciò rappresenta un grandissimo vantaggio per evitare gli sprechi di materiale, anche nell'eventualità in cui il fotopolimero entri a contatto con la luce solare danneggiandosi. Tra la vasca con il polimero ed il proiettore è presente un vetro attraverso cui passa la luce ultravioletta.

Un'altra variante consiste nel proiettore posto ad una distanza ravvicinata, che avanza per irradiare in modo selettivo la sezione, di modo che il fascio si mantenga perpendicolare alla superficie. In questo modo è possibile sfruttare una superficie di lavoro superiore rispetto al caso tradizionale, però si impiega più tempo.

I materiali sono fotopolimeri termoindurenti che non prevedono applicazioni ad alta temperatura.

Le applicazioni riguardano diversi ambiti, tra questi quello di maggior spicco è la gioielleria, per la creazione di modelli a perdere per il ciclo di microfusione, oppure nel settore dentale come il polyjet/project abbinato allo scanner intra-orale. Altri settori sono quello biomedicale, manifatturiero, automotive e aerospaziale.

Per il processo di Direct Light Projection possiamo individuare i seguenti vantaggi:

1. Limitato contatto con il fotopolimero liquido;
2. Possibilità di realizzare elementi trasparenti o traslucidi;
3. Buone prestazioni in termini di tolleranze dimensionali e rugosità superficiali, anche se inferiori alla stereolitografia;
4. Assenza di post-trattamento;
5. Assenza di vincoli per l'installazione;
6. Ampia gamma di fotopolimeri disponibili.

Gli svantaggi, invece, sono:

1. Materiale termoindurente, non riciclabile;
2. Necessità di supporti
3. Impossibilità di sfruttare il volume di lavoro, il cosiddetto nesting;
4. Volumi di lavoro limitati.

1.1.12 Drop on Demand

È una tecnica di fabbricazione additiva che parte da polimero allo stato liquido ed il cui processo si basa sulla stampa a getto. La testina di stampa deposita il materiale del componente, che a differenza del caso precedente non è un fotopolimero, bensì un polimero termoplastico a basso punto di fusione, simil cera, successivamente si effettua la fresatura dello strato deposto per controllare lo spessore.

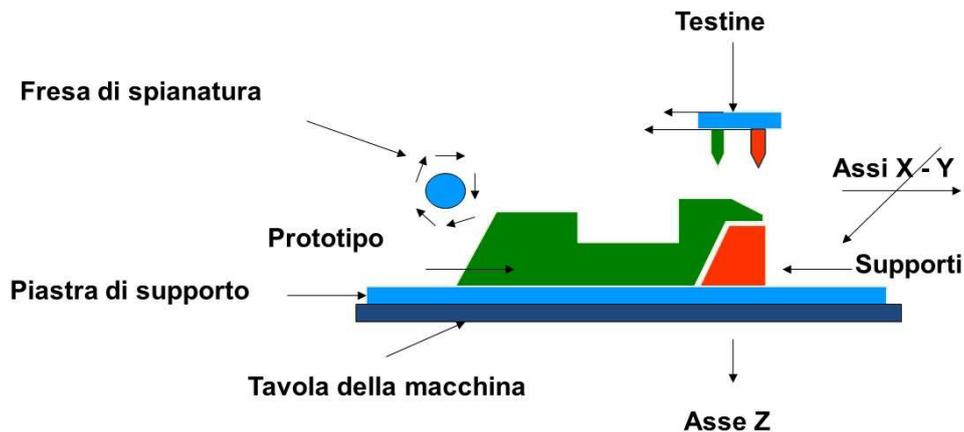


Figura 23: Processo Drop on Demand [2]

Come si può notare in figura sono presenti due testine di stampa che servono per il materiale del componente e per quello relativo ai supporti; esse si muovono lungo gli assi x e y, mentre la piattaforma di costruzione si abbassa lungo l'asse z.

I polimeri vengono caricati sotto forma di granuli all'interno di contenitori riscaldati, qui passano allo stato liquido e vengono inviati alle testine. Queste presentano un piezoelettrico che permette la deposizione del polimero in gocce sferiche, le quali impattando sul precedente strato depositato si schiacciano, generando quindi una superficie irregolare. Per questa ragione, a seguito della deposizione, entra in azione la fresa elicoidale che spiana in modo preciso, garantendo lo spessore di strato corretto e quindi tolleranze precise lungo l'asse z. Questa tecnica permette di variare lo spessore dello strato, eseguendo lo slicing adattativo, cioè si creano strati più alti per privilegiare la velocità di costruzione e strati più sottili per incrementare la qualità.

I supporti sono solubili in idrocarburi, che non aggrediscono il polimero con cui viene realizzato il componente. La solubilità dei supporti è un vantaggio nel caso di cavità interne complesse, inoltre si possono creare pareti sottili senza che, un eventuale eliminazione meccanica dei supporti, ne causi un danneggiamento. Quindi si va incontro ad un minor tempo impiegato per la finitura, quindi un minor costo, ma anche ad una maggiore qualità superficiale.

L'applicazione fondamentale è per la creazione di modelli a perdere per la microfusione nei settori della gioielleria, della meccanica di precisione, dentale e medicale. [2]



Figura 24: Componenti costruiti mediante Drop on Demand

È un processo di nicchia, con costi non proibitivi, però più lento rispetto la stereolitografia o il polyjet/project, la precisione e la risoluzione è buona, quindi questa tecnica è adatta per la replicazione di dettagli.

Possiamo in definitiva esprimere i vantaggi di questa tecnica come:

- Buone prestazioni in termini di tolleranze e rugosità superficiali;
- Solubilità dei supporti;
- Materiali atossici
- Assenza di post-trattamento, se si esclude la fresatura;
- Assenza di vincoli per l'installazione.

Gli svantaggi invece comprendono:

- Scarse proprietà meccaniche dei materiali;
- Volumi delle macchine limitate e quindi realizzazione di piccoli componenti;
- Velocità di costruzione moderata;
- Impossibilità di saturare il volume di lavoro in altezza.

1.1.13 Fused Deposition Modelling

La Fused Deposition Modelling, o FDM, è la tecnica AM molto conosciuta per i sistemi low cost non destinati ai settori industriali, il materiale di partenza è sotto forma solida, nello specifico si parte da un filo che viene estruso al fine di depositare le singole sezioni. Insieme alle tecniche che trattano polvere la FDM fa uso di materiali definitivi, in particolare si impiegano gli stessi polimeri termoplastici utilizzati nello stampaggio ad iniezione.

Il processo è molto semplice, consiste nell'estrusione del filamento di materiale termoplastico sulla piattaforma di lavoro, per le stampanti low cost si ha un unico ugello di estrusione che

deposita un solo materiale per il componente e per i supporti. La versione industriale prevede invece due ugelli, come illustrato in Figura 25, per distinguere il termoplastico del pezzo da quello del supporto. [2]

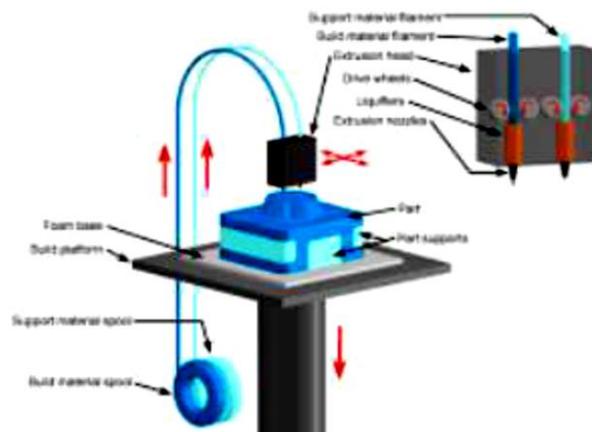


Figura 25: Processo FDM

La testa di estrusione si muove lungo gli assi x-y del piano di lavoro, mentre la piattaforma scende lungo l'asse z.

Non è una tecnica velocissima, inoltre non è affatto banale da controllare in quanto bisogna fare in modo che la temperatura di estrusione sia corretta per permettere allo strato depositato di aderire a quello precedente, ma allo stesso tempo evitare che il materiale coli. Bisogna trovare un compromesso per ciò che concerne la temperatura, non troppo fredda altrimenti non si garantisce l'aderenza tra gli strati, né troppo calda o si rischia che il materiale coli prima del tempo dall'ugello.

I supporti ed il pezzo non possono essere di materiali completamente diversi, infatti anche i supporti sono realizzati in polimeri termoplastici, ma con una formulazione tale da essere successivamente rimossi sciogliendoli in soluzione acquose.

Il filamento di partenza può anche essere colorato, tuttavia a differenza della tecnica polyjet/project che prevede più ugelli e quindi la possibilità creare componenti multi materiale e di più colori, con la tecnica FDM il pezzo finale sarà monocromatico.

Tipicamente per una questione visiva si impiegano colori differenti per il componente e per i supporti, quest'ultimi solitamente sono in materiali scuro, per agevolare la loro identificazione nella successiva fase di rimozione. Benché i supporti siano solubili, per accelerare la loro eliminazione, usualmente si cerca di rimuovere la maggior parte di essi meccanicamente e

solo in una seconda fase il componente è immerso nella vasca contenente la soluzione acquosa in grado di sciogliere la restante parte dei supporti.

Il processo è di tipo termico e non presenta particolari criticità, non si ha a che fare con fotopolimeri, né con polvere, o laser o lampade UV, non presenta quindi alcun rischio per gli operatori.

Quello che si deve sottolineare, rispetto alle tecniche che partono da liquidi, è lo spessore dello strato maggiore, in particolare è di un ordine di grandezza più grande rispetto alla stereolitografia, ciò è conseguenza del fatto che si parte da un filo, che deve attraversare l'ugello, che ha un certo diametro. Spessori di strato elevati si traducono in un peggioramento delle tolleranze dimensionali, ma soprattutto della rugosità superficiale, tuttavia non si può pensare di avere ugelli di estrusione con diametri di pochi centesimi di millimetro, in quanto non permetterebbero una corretta deposizione. Si parla comunque di spessori che oscillano tra 0,2 e 0,5 mm, qualora in macchine più grandi si voglia prediligere la velocità di costruzione.

I materiali disponibili sono i termoplastici:

- ABS;
- PC;
- Nylon;
- ULTEM;
- PPSF (polifenilsulfone);
- PLA (polimero a basse prestazioni);
- TPU (materiale flessibile).

L'ABS è il polimero più usato e la sua temperatura di transizione vetrosa è 108°C, quindi già paragonato ai fotopolimeri si nota una maggiore resistenza alle alte temperature, oltre che il vantaggio della riciclabilità.

L'ULTEM è un materiale autoestinguento, cioè che non propaga la fiamma, utilizzato in campo aerospaziale e navale, le cui caratteristiche meccaniche sono particolarmente anisotrope, infatti risente della direzione di costruzione, ciò è indicativo per posizionare correttamente il pezzo sulla piattaforma. Il PPSF è interessante per le prestazioni termiche, in quanto è in grado di resistere fino ai 230°C.

Il materiale è approvvigionato nelle cosiddette bobine intelligenti, in cui è presente un chip che indica quanto materiale è presente all'interno di modo che, qualora la bobina fosse stata precedentemente utilizzata e vorremmo riutilizzarla per la costruzione di un nuovo pezzo, sarà possibile sapere quanto materiale è rimasto all'interno e se è sufficiente per concludere il job che si intende realizzare.

Per quanto riguarda le applicazioni, si possono sintetizzare in 3 famiglie:

1. Prototipazione funzionale;
2. Produzione di parti definitive, progettate per AM;
3. Produzione di stampi preserie.

La differenza sostanziale del FDM rispetto lo stampaggio ad iniezione è che bisogna eseguire la finitura superficiale del componente a seguito della deposizione, mentre un oggetto che esce dallo stampo è già finito. La finitura comprende il carteggio per eliminare le tracce dello slicing e della deposizione, ma i componenti possono anche essere estetizzati con opportune pellicole per simulare materiale differenti quali alluminio, fibra di carbonio, acciaio, radica.

Per quanto concerne i vantaggi:

- È una tecnica che assicura buone prestazioni in termini di tolleranze, è peggio rispetto alla stereolitografia perché estrudiamo un filamento, tuttavia le tolleranze sono analoghe a quelle che si possono ottenere dai processi tradizionali;
- Supporti solubili in soluzione acquosa, processo che facilita la rimozione senza il danneggiamento del componente;
- Impiego di polimeri termoplastici, riciclabili;
- Assenza di post-trattamento, a parte la rimozione dei supporti;
- Assenza di vincoli di installazione per la macchine, che non presenta criticità.

Gli svantaggi del processo di Fused Deposition Modelling comprendono:

- Necessità di rimozione dei supporti;
- Necessità di carteggiare il componente a seguito della sua costruzione per ottenere una rugosità superficiale accettabile;
- Impossibilità di sfruttare l'intero volume di lavoro lungo l'asse z.

1.1.14 Selective Laser Sintering

È una tecnica di additive manufacturing che parte da polvere ed usa, come sorgente termica per fondere selettivamente le particelle, un laser. Al momento è l'unica che, partendo da polvere, è in grado di realizzare componenti in materiali definitivi, essendo la collega 3D Printing una tecnica che prevede l'uso di polvere e di un legante che aggrega le particelle. Questo pregio è di grande interesse per la produzione definitiva oltre che per la prototipazione funzionale.

Anche se il nome trae in inganno, in quanto la sua traduzione è sinterizzazione laser selettiva, in realtà non si sinterizza, ma le polveri polimeriche vengono portate a fusione dal laser.

Il processo, illustrato in Figura 26, consiste in un laser fisso che viene focalizzato da un sistema di specchi e fonde selettivamente lo strato di polvere, precedentemente deposto e livellato da una racla o rullo. Alla fine della creazione della sezione l'elevatore scende lungo l'asse z e la racla deposita il nuovo strato di polvere, cosicché il processo possa ricominciare.

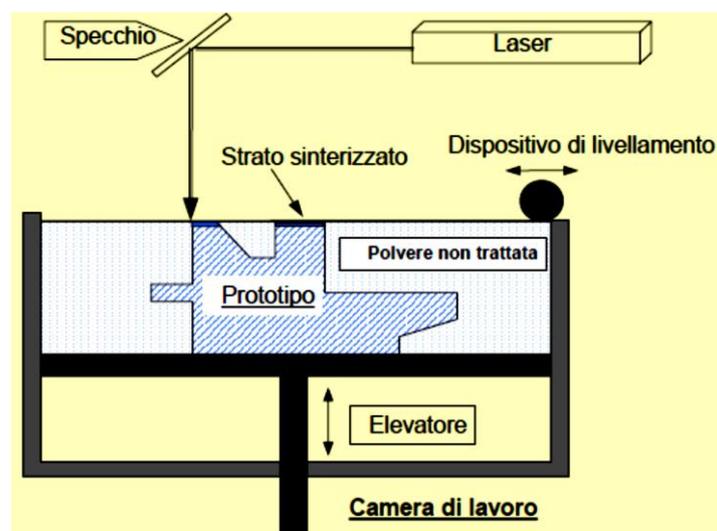


Figura 26: Processo Selective Laser Sintering [2]

In questo caso non servono supporti perché il letto di polvere è abbastanza compatto, sia per via del preriscaldamento cui è sottoposta la camera di lavoro, sia per via del rullo; inoltre poiché la densità tra polvere e solido non cambia molto, il componente solidificato non affonda e la polvere riesce a sostenerlo. All'interno della camera di lavoro si insuffla azoto e la temperatura di preriscaldamento è prossima a quella di fusione del polimero, ciò determina due vantaggi:

1. Il laser ha una potenza installata bassa, essendo necessario un $\Delta T=20-30^{\circ}\text{C}$ per arrivare a fusione;
2. Si evitano ritiri di solidificazione poco controllati, infatti nei polimeri il ritiro è funzione del gradiente termico, che qui si mantiene abbastanza basso.

Nel caso dei materiali metallici, che presentano temperature di fusione molto elevate, il preriscaldamento della camera non è sufficiente a garantire gradienti di temperatura ridotti, ragion per cui il ritiro sarà maggiore con conseguente necessità dei supporti, che avranno anche la funzione di evitare la deformazione della sezione creata.

Lo svantaggio è che, alla fine del processo di costruzione, si avrà un blocco compatto che si troverà alla temperatura di preriscaldamento della camera, che non può essere subito raffreddato per iniziare la fase di pulizia, altrimenti si incorrerebbe nella deformazione del componente. Per questa ragione è necessario un raffreddamento naturale di tutto il blocco, che però viene rimosso dalla macchina, di modo che essa possa ripartire a lavorare.

La copertura di azoto è fondamentale a non ossidare il polimero, infatti ricordiamo che siamo quasi alla temperatura di fusione, quindi la polvere reagirà con l'ossigeno diventando del tipico colore giallo.

L'SLS è l'unica tecnica che, grazie alla compattezza della polvere polimerica, permette la saturazione completa del volume di lavoro, potendo di fatti porre i componenti uno sull'altro, dividendoli da qualche strato di polvere, il cosiddetto Nesting 3D, del quale è possibile osservarne un esempio in Figura 27. [2]

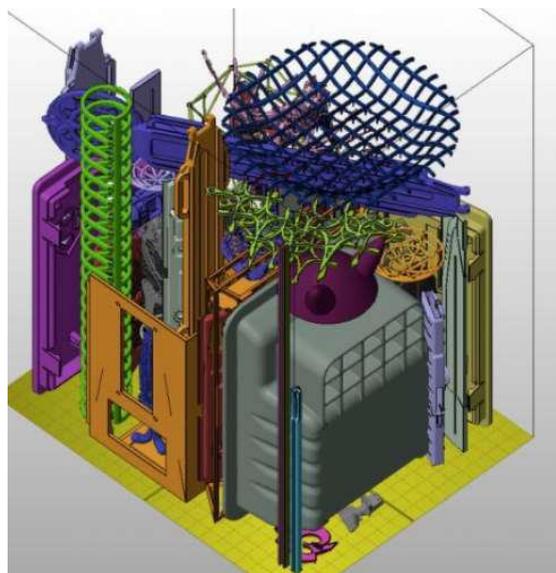


Figura 27: Esempio di Nesting 3D

È importante sottolineare che la polvere trattata ad alta temperatura può essere riciclata, non integralmente, ma in parte, e quindi impiegata nuovamente in combinazione con la polvere vergine.

Le applicazioni di questa tecnologia riguardano:

1. Produzione diretta di parti definitive;
2. Prototipazione funzionale;
3. Produzione di modelli sacrificali per la fusione a cera persa.

Le prime due applicazioni comprendono l'85% in ambiti anche particolari come la moda, l'arredamento d'interni, oltre che l'aerospazio, il racing e la medicina, mentre il restante 15% riguarda l'impiego in fonderia.

I polimeri termoplastici disponibili sono: il polistirene (PS) principalmente in applicazioni in fonderia, il Polietereterchetone (PEEK), un tecnopolimero dalle proprietà interessanti, il nylon o poliammide (PA12) che può essere puro o caricato con differenti tipi di particelle che consentono di modificare le caratteristiche meccaniche, già buone in confronto con i fotopolimeri. Le particelle della carica vengono miscelate prima di essere caricate in macchina con le polveri di PA12 e devono avere una granulometria compatibile con quest'ultime. Le cariche ad esempio possono aiutare ad aumentare il modulo elastico, rendendo il componente più rigido, ma non vanno a cambiare le prestazioni termiche, che sono vincolate dalla matrice, ossia il nylon. Le particelle che più comunemente vengono aggiunte sono: sferette di vetro, particelle di Al, fibre corte di carbonio o additivi che rendono il materiale autoestinguento.

Riepilogando i vantaggi della Sinterizzazione Laser Selettiva:

1. Buone prestazioni in termini di tolleranze dimensionali e rugosità superficiali, meglio rispetto all'FDM, un po' peggio della stereolitografia;
2. Materiali termoplastici definitivi, come per lo stampaggio ad iniezione;
3. Elevata produttività, le macchine sono molto più produttive in confronto a tutte le altre stampanti viste, si arriva anche a 3 l/h considerando una saturazione sul piano xy del 75%;
4. Possibilità di Nesting 3D;
5. Assenza di supporti;

6. Possibilità di inserire nuovi componenti a job avviato;
7. Assenza di post- trattamenti, pulizia a parte;
8. Vincoli limitati per l'installazione, la polvere non è tossica, ma presenta comunque la una granulometria ridotta, quindi si deve prestare attenzione a non inalarla.

I limiti di questa tecnica riguardano:

1. Limitata disponibilità di materiali, essenzialmente 3;
2. Assenza di automazione che permetta l'abbattimento dei tempi morti;
3. Tempi lunghi per il cambio materiale in macchina, si deve pulire accuratamente la camera di lavoro della macchina prima di cambiare la polvere, altrimenti si verificano contaminazioni.

1.1.15 3D Printing per i materiali polimerici e ceramici

È una tecnica che ha come materiale di partenza sempre la polvere, però in questo caso non si ricorre ad una sorgente termica che porta a fusione il materiale, si avrà invece un collante che viene depositato selettivamente sul letto di polvere, al fine di legare assieme le particelle. La tecnica 3D Printing nonostante sia nata agli albori dell'Additive Manufacturing, ha avuto un buon successo in particolar modo negli anni 2000 per la produzione di modelli concettuali, laddove non si disponeva di sistemi che li creassero in tempi rapidi e a costi contenuti. Man mano con l'avvento e la diffusione dei processi Polyjet e FDM questo interesse è andato progressivamente scemandosi.

In Figura 28 si può osservare l'interazione di una gocciolina di legante con il letto di polvere, il processo si può assimilare all'usuale stampa su carta, in cui l'inchiostro è rappresentato dal legante, mentre la carta è il letto di polvere, ad eccezione del fatto che il legante penetra il letto di polvere per raggiungere lo strato depositato precedentemente. [2]

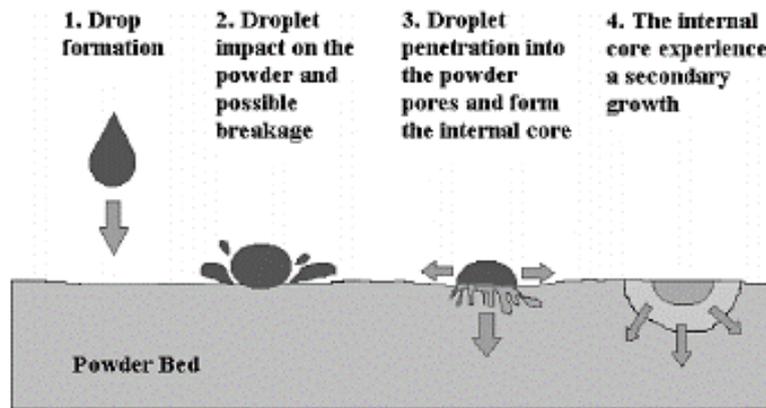


Figura 28: Interazione di una gocciolina di legante con il letto di polvere

Per quel che riguarda i ceramici come materiale si ha solo il gesso ed il collante è un cianoacrilato, benchè non abbia grandi sbocchi nel settore ingneristico, esso presenta alcune caratteristiche che lo rendono interessante nell'ambito dell'architettura. Il gesso ovviamente non è adatto per prototipi funzionali o per la produzione definitiva, tuttavia la possibilità di stampare a colori con delle buon rese foto realistiche lo rendono adatto per la i modelli concettuali. Basta inserire più testine di stampa con i colori primari al fine di realizzare qualunque sfumatura. L'attributo del colore viene inserito tramite un software nel file STL, scegliendolo per ogni triangolo, insieme alle coordinate e alla normale.

Una volta completata la stampa, il componente rimane immerso nel letto di polvere, si aspira quella in eccesso e si procede con il post-trattamento di infiltrazione per consolidare la parte e migliorarne le prestazioni meccaniche. Infatti si deposita una quantità di collante strettamente necessaria per aggregare la parte, se si utilizzasse troppo collante la sezione tenderebbe ad affondare sul letto di polvere.

La polvere poiché non ha subito alcun processo termico può essere integralmente riutilizzata.

I vantaggi della 3 Dimensional Printing sono:

1. Buona resa foto realistica grazie alla stampa a colori, infatti assieme al polyjet sono le uniche tecniche che permette di stampare a colori;
2. Elevata produttività;
3. Possibilità di variare le prestazioni del componente in funzione dell'infiltrante;
4. Assenza di supporti;
5. Assenza di vincoli per l'installazione, in quanto si ha a che fare con la polvere di gesso.

Per quel che concerne i materiali polimerici il processo è il medesimo che per i ceramici, il polimero impiegato è il Polimetilmetacrilato (PMMA).

Le applicazioni principali riguardano la realizzazione di:

- Modelli a perdere per la microfusione;
- Modelli concettuali, in cui il materiale non è il polimero definitivo;
- Prototipi funzionali, se le prestazioni sono simili al materiale definitivo;
- Forme e anime per la fusione in sabbia, applicazione più importante.

Con il rapid casting si costruiscono rapidamente i primi getti metallici, realizzando in fabbricazione additiva modelli e anime, al fine di mettere a punto il progetto. Quando si consolida il modello e la cassa d'anima, si procede alla loro produzione definitiva con le tecniche convenzionali, soprattutto se si devono costruire molti getti poiché non si ha più la convenienza economica.

Si possono evidenziare i seguenti vantaggi della 3 Dimensional Printing per materiali polimerici:

1. Ampi volumi di lavoro, si arriva fino a 4x2x1 m;
2. Elevata produttività;
3. Possibilità di modificare le caratteristiche del materiale con l'aiuto dell'infiltrante;
4. Assenza di supporti;
5. Applicazioni consolidate in fonderia.

Gli svantaggi della tecnica sono condivisi sia dai polimeri che dai ceramici e sono principalmente due:

1. Necessità di post trattamento di infiltrazione per migliorare le prestazioni del materiale, che non potrà essere quello definitivo;
2. Impossibilità di sfruttare l'intero volume di lavoro per problemi di affondamento del pezzo all'interno del letto di polvere.

1.2 Progettazione per l'Additive Manufacturing

La fabbricazione additiva è una tecnologia che rende possibile la produzione di oggetti, anche molto complessi, partendo solo da un file CAD e senza l'impiego di utensili.

Abbiamo già ampiamente discusso i vantaggi e gli svantaggi dell'additive manufacturing e abbiamo messo in evidenza come sia possibile parlare di essi, se e solo se il componente viene pensato e progettato per essere prodotto con le tecnologie di AM, tenendo conto della funzionalità e fattibilità.

La reale fattibilità di un componente, mediante le tecniche di fabbricazione additiva, dipende però dalla disponibilità del modello CAD tridimensionale, rappresentando questo un prerequisito imprescindibile, nonché il punto di partenza.

1.2.1 Il ciclo della fabbricazione additiva dal CAD alla stampa

Come ogni processo di produzione anche l'Additive Manufacturing segue un ben preciso ciclo di lavoro, schematizzato in Figura 29.

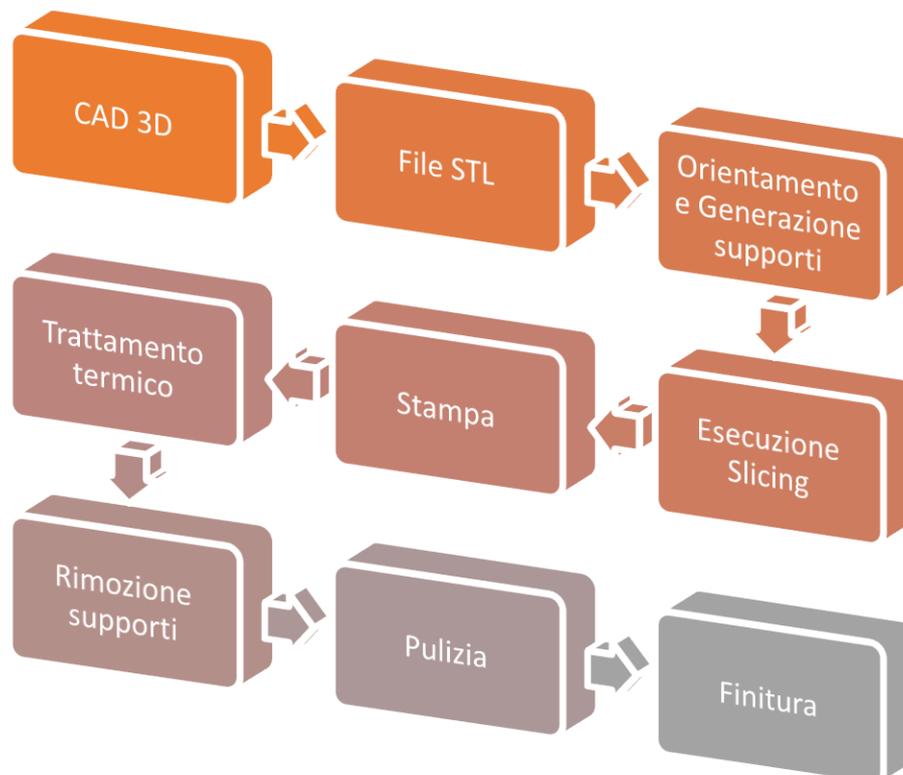


Figura 29: Ciclo di lavoro dell'Additive Manufacturing

Il punto di partenza è la creazione del modello CAD 3D mediante un software di disegno, in seguito si effettua la conversione nel formato STL, che rappresenta lo standard universale dei modelli matematici per la fabbricazione additiva. Il file STL viene esportato direttamente nella macchina oppure in un software dedicato che permette di lavorarci ulteriormente, ad esempio consente di aggiungere i sovrametalli o di valutare i supporti.

Successivamente si passa all'orientamento del componente all'interno del volume di controllo della macchina, alla generazione dei supporti, qualora la tecnica lo preveda, e all'esecuzione dello slicing, operazione matematica che prevede l'intersezione del file STL, comprensivo di supporti, con piani paralleli tra loro e perpendicolari all'asse z.

In seguito si passa alla costruzione fisica del componente, sezione per sezione; al trattamento termico qualora si tratti di un materiale metallico; infine si effettuano le operazioni manuali di rimozione supporti, pulizia e finitura superficiale.

Vediamo adesso nel dettaglio le varie fasi del processo produttivo, le problematiche che si possono presentare e le tipologie di scelte che vanno prese per garantire la corretta conclusione del job.

Il formato STL (STereolithography Interface Format o Standard Triangulation Language) è stato sviluppato da Chuck Hall, fondatore di 3D Systems, proprio con l'intento di creare un formato utilizzabile nelle prime stampanti 3D.

I file .stl approssimano un CAD solido in un modello di tipo "shell" in cui la superficie esterna è discretizzata in triangoli di diverse dimensioni, per ricostruire al meglio il modello di partenza, ad esempio nelle zone più complesse, dove sarà necessario trasferire un maggior numero di informazioni, si assisterà ad un infittimento dei triangoli. Maggiore è il numero dei triangoli che approssimano la superficie migliore sarà la qualità della riproduzione, tuttavia è bene trovare un compromesso, perché un numero esagerato di triangoli può comportare la

creazione di un file troppo pesante senza apportare alcun beneficio. Nel file .stl ogni triangolo è descritto da tre punti che individuano la posizione dei vertici e dalla normale alla superficie.

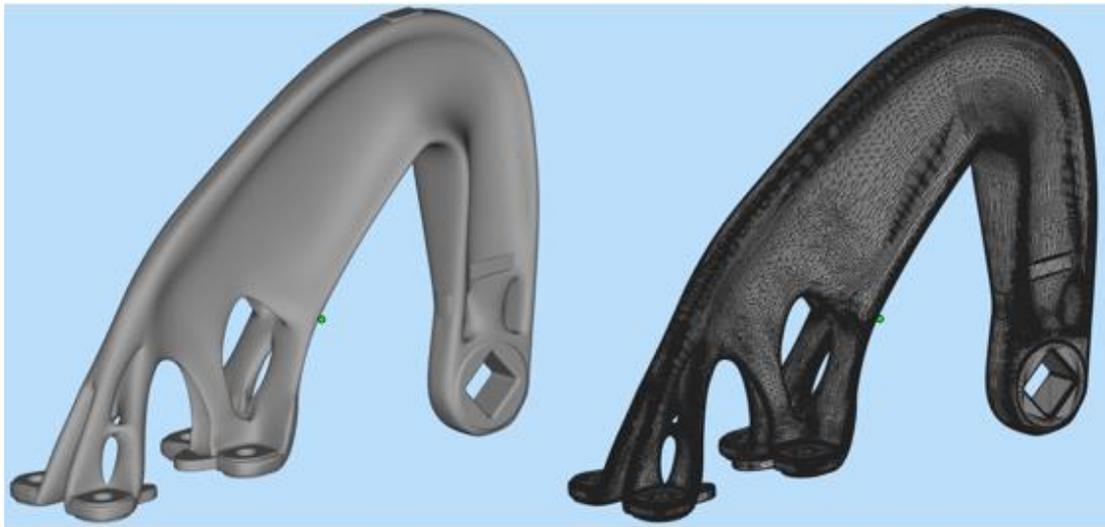


Figura 30: Modello CAD 3D e modello "shell" nel formato STL

Questa conversione viene attuata al fine di avere uno standard riconosciuto da tutte le macchine, ma anche perché queste ultime riescono a gestire più agevolmente questo tipo di file. L'uso di questo formato, benché sia ad oggi il più affidabile e diffuso nel panorama dell'AM, presenta diversi problemi dovuti all'approssimazione. La prima tipologia di errore che si può riscontrare è l'errore cordale ϵ_c rappresentato in Figura 31:

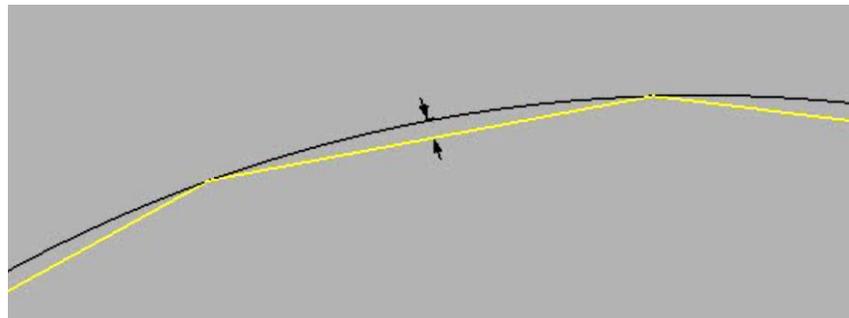


Figura 31: Errore cordale [2]

Si tratta fondamentalmente della distanza tra la spezzata, traccia del STL, e la curva continua, traccia del CAD 3D. L'errore cordale determina quindi un errore di faceting o di sfaccettatura. È un errore comunque controllabile ed imposto dall'utente durante la fase di conversione dal CAD, un tipico valore di ϵ_c è 0.01 mm, più tale errore si mantiene basso migliore sarà la qualità della stampa.

Altri tipologie di errori in cui si può incappare sono: spazi vuoti tra le celle, normali invertite o intersezioni tra triangoli, come mostrato in Figura 32; tuttavia esistono diversi software correttivi che permettono di gestire la maggior parte di questi errori.

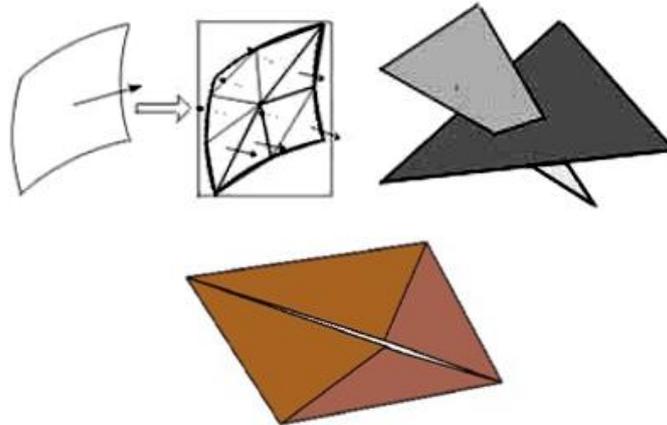


Figura 32: Tipici errori rilevabili nei file STL [2]

È bene comunque che il modello CAD di partenza sia creato in modo ottimale, così da evitare che anche un piccolo errore iniziale si traduca dopo in un job di stampa fallimentare.

Gli altri step fondamentali, che devono viaggiare di pari passo, sono l'orientamento in macchina e conseguente generazione dei supporti e realizzazione dello slicing. È proprio l'orientamento del componente all'interno del volume di lavoro che influenza la quantità e la disposizione dei supporti e la tipologia di slicing. Queste scelte condizionano:

- La qualità del componente costruito;
- Il tempo di stampa;
- Le caratteristiche meccaniche, in quanto l'AM è un processo anisotropo.

In generale i supporti hanno la funzione di:

1. Ancorare il componente alla piattaforma di lavoro, permettendone in seguito la rimozione;
2. Supportare le parti sporgenti, evitandone la deformazione;
3. Proteggere le parti laterali da azioni che ne compromettono la costruzione.

In base alle diverse tecniche di fabbricazione additiva e al materiale impiegato per la costruzione del componente, i supporti possono anche presentare altre funzioni, che vanno valutate di caso in caso. Un esempio è rappresentato nelle tecniche a letto di polvere per i metalli, in cui i supporti svolgono anche l'importantissimo ruolo di smaltimento e

ridistribuzione del calore su tutto il componente, migliorando i tensionamenti interni e le distorsioni termiche dovute alle elevate temperature in gioco.



Figura 33: Componente metallico con supporti (sinistra) e senza (destra).

Nonostante la rilevanza che i supporti abbiano, rappresentano pur sempre del materiale di scarto, che durante la fase di stampa dovrà essere fisicamente creato e nelle fasi successive dovrà essere rimosso, quindi è essenziale orientare correttamente il componente per ridurre al massimo la quantità di supporti, proprio per contenere i tempi ed i costi di stampa e di post processing. Vedremo in seguito, nel paragrafo dedicato al Design for Additive Manufacturing, tutti i casi che prevedono l'impiego dei supporti e come minimizzarli.

Lo slicing è praticamente la suddivisione del componente, comprensivo di supporti e già orientato opportunamente, in sezioni di spessore pari ad un Δs , che poi vengono fisicamente costruite con la stampante 3D, in Figura 34 è possibile osservare un esempio di slicing. I piani paralleli tra loro sono perpendicolari alla direzione di crescita del componente.

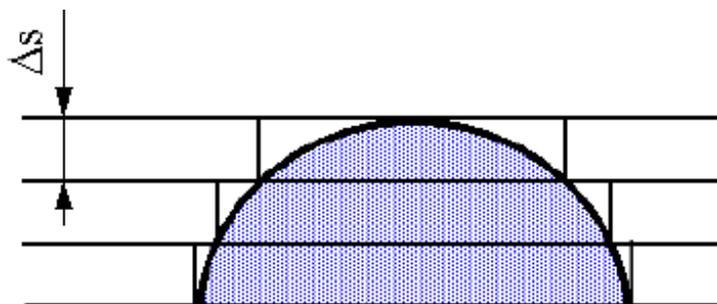


Figura 34: Slicing

I valori di Δs raggiungibili dipendono dalla macchina, ma tanto più questi valori si mantengono bassi tanto migliore è la qualità superficiale, infatti allo slicing è associato l'errore "stair case", o effetto scala, in cui la superficie ha un effetto scalinato, come si può notare in Figura 35.



Figura 35: Effetto scala in funzione del Δs

Per valori di Δs molto piccoli, come il caso all'estrema destra in Figura 35, l'effetto scala è decisamente meno marcato rispetto al caso centrale, che presenta un Δs nettamente maggiore. Si deve tuttavia trovare sempre un compromesso perché diminuendo troppo lo spessore dello strato si incorre nell'incremento del tempo di stampa e nelle dimensioni del file STL. Valori tipici di Δs nel caso di materiali polimerici sono $0.05 \div 0.3$ mm, in funzione della rugosità che si desidera ottenere, mentre nel caso di metalli il Δs è compreso tra 0.02 e 0.05 mm per problemi legati al ritiro della sezione.

In alcuni casi è possibile ricorrere al cosiddetto slicing adattativo, cioè non si impone uno spessore di strato costante per tutte le sezioni, ma lo si riduce il Δs solo dove è necessario. Il Δs variabile mi consente di ottenere una qualità superficiale superiore, ad esempio in superfici verticali non è necessario, ma se la pendenza tende a diminuire l'effetto stair case si riesce a contenere solo diminuendo il Δs . [2]

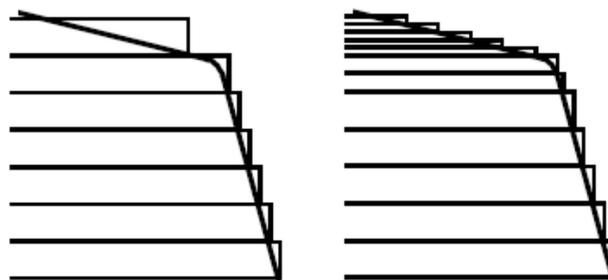


Figura 36: Slicing costante Vs Slicing adattativo

Lo slicing adattativo non è sempre possibile, ad esempio nelle tecniche che partono da materiale allo stato solido, sotto forma di filo, non si riesce a ridurre lo spessore, perché questo sarà funzione del diametro dell'ugello, che è un valore fisso. Si può pensare di attuare questo accorgimento, ad esempio nelle tecniche a letto di polvere per i metalli, in cui però la piattaforma deve essere satura di componenti tutti uguali tra loro. È comunque da sottolineare che lo stair case è fenomeno facilmente correggibile mediante un trattamento di carteggiatura successivo.

L'orientamento di un componente nel volume di lavoro, come abbiamo accennato precedentemente, influenza la quantità dei supporti e la possibilità che si verifichi l'effetto scala. In Figura 37 è possibile osservare un componente cilindrico e tre differenti orientamenti.

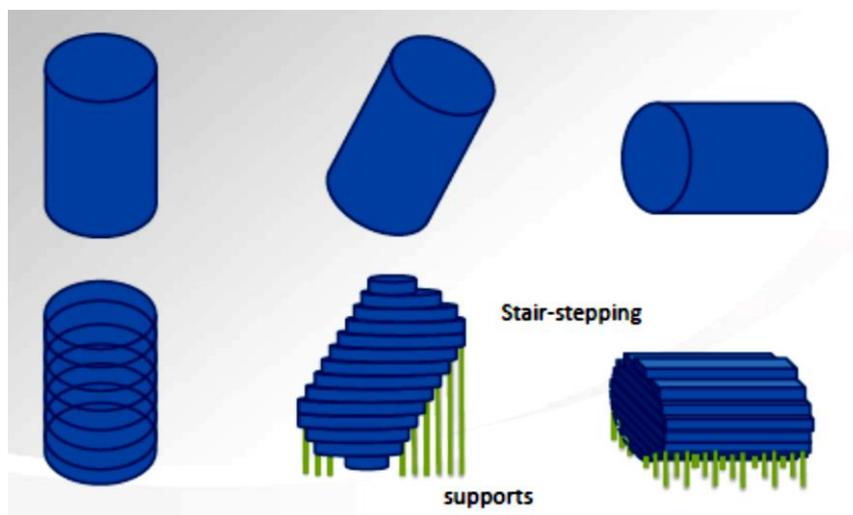


Figura 37: componente cilindrico e 3 diversi orientamenti

Supposto lo spessore dello strato costante, la variazione dell'orientamento genera dei risultati sensibilmente diversi:

1. Cilindro in posizione verticale: non si evidenzia la necessità di supporti, se non una minima quantità necessaria ad ancorare il pezzo alla piattaforma, a meno che il componente pieno sia in materiale metallico e sia indispensabile evacuare il calore, l'effetto scala sarà il minore ottenibile, tuttavia un'altezza maggiore del job provocherà un aumento del build time;
2. Cilindro in posizione orizzontale: sono necessari parecchi supporti su una superficie piuttosto estesa; l'effetto scala sarà il peggiore dei tre casi; tuttavia il job sarà il più veloce possibile;

3. Cilindro variamente inclinato: sarà bene trovare un'inclinazione opportuna che permetta di impiegare la minor quantità di supporti, l'effetto scala sarà evidente, ed il tempo di stampa avrà un valore compreso tra i due casi precedenti.

In questo caso il progettista deve fare delle scelte e valutare se prediligere la finitura superficiale piuttosto che il tempo di produzione.

In seguito alla fase di stampa, totalmente a carico della macchina, se il componente è in materiale metallico ed il processo lo prevede, si può effettuare un trattamento termico. Tendenzialmente si ritiene necessario a seguito della tecnica Selective Laser Melting (SLM) per applicazioni che prevedono la resistenza al creep e alle alte temperature, in tal caso si può eseguire un primo trattamento termico del componente quando è ancora ancorato alla piattaforma con i supporti, in modo da distendere lo stato tensionale in cui si trova e successivamente un secondo trattamento termico che permette di ingrandire il grano cristallino per ottenere le caratteristiche meccaniche richieste.

Le fase di rimozione supporti può avvenire o manualmente o tramite l'elettroerosione a filo, in funzione della rigidità della parte e della sua complessità, in alcuni casi i supporti sono solubili in diverse soluzioni. In seguito si passa alla finitura superficiale per eliminare le tracce che hanno lasciato i supporti e per garantire la rugosità superficiale richiesta per il componente. La finitura può comprendere anche la verniciatura, la placcatura, la metallizzazione, la lucidatura, la sabbiatura.

1.2.2 L'ottimizzazione topologica

La prerogativa di qualunque settore produttivo è quella di creare i migliori prodotti il più velocemente possibile e al prezzo più basso, per questa ragione l'ottimizzazione gioca un ruolo decisivo nel design di un prodotto.

L'ottimizzazione topologica in quest'ottica, ricerca l'ottimo nella distribuzione di materiale all'interno di un componente, modificandone anche la sua geometria e avendo come fine ultimo l'alleggerimento del prodotto e la massimizzazione delle sue prestazioni. Essa è una delle fasi più importanti della metodologia del Design for Additive Manufacturing, comporta un re-design dell'oggetto di partenza, tenendo però conto dei vincoli progettuali, e tramite dei software dedicati è possibile porre materiale solo dove strettamente necessario. Tali software lavorano mediante algoritmi che suggeriscono, in funzione degli stati tensionali cui

l'oggetto è sottoposto, dove il materiale è indispensabile per garantire una determinata resistenza.

Questa tecnica, seppur non di recente scoperta, ha trovato nell'additive manufacturing un ottimo alleato, in quanto in passato le forme particolarmente complesse che i software proponevano, non erano poi di facile produzione. Con l'avvento della stampa 3D è tornata in auge e si può sfruttare del tutto le potenzialità di tale tipologia di ottimizzazione. I primi studiosi che si occuparono di ottimizzazione topologica furono Lagrange (1770), De Saint Venant (1800), Clausen (1851), quindi è un'ottimizzazione che fa parte della progettazione classica.

Oltre l'importante riduzione di peso alla quale si può andare incontro, con conseguente diminuzione della quantità di materiale che è necessario per la stampa, un altro vantaggio non banale è la progettazione legata ai vincoli funzionali piuttosto che alla forma del componente, ne segue una riduzione dei costi ed un impatto certamente positivo su tutto il processo produttivo.

In Figura 38 si può osservare un esempio di re-design ed ottimizzazione topologica di un componente che inizialmente pesava circa 1,9 kg e che a seguito della riprogettazione e realizzazione in AM è arrivato a pesare 0,267 kg, con un 86% di riduzione complessiva di peso, mantenendo i vincoli progettuali richiesti in termini di minimo fattore di sicurezza e massima deformazione ammissibile.

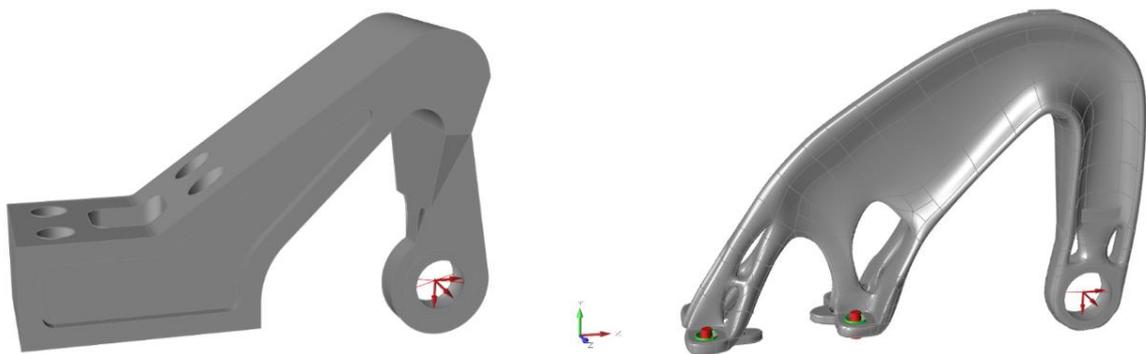


Figura 38: Differenza tra il componente di partenza e quello riprogettato

Uno stesso componente con le medesime condizioni di carico, stessi vincoli progettuali e stesso materiale, a seconda della visione del progettista può essere ottimizzato

topologicamente ed in generale riprogettato in modi diversi, giocando sia sul possibile design finale che sul processo, in base alla sua libera creatività.

Nei settori come quello navale, dell'aviazione, dell'aerospazio, o del motorsport il fattore peso gioca un ruolo cruciale, perché impattante indirettamente sulla convenienza economica del prodotto. Basti pensare a qualunque mezzo di trasporto, in cui bisogna portar dietro del peso in più, evitabile, ciò corrisponde ad un maggior dispendio di carburante e quindi un costo maggiore. Discorso ancora più delicato in ambito aerospaziale, in cui lanciare solo 1 kg in più comporta un costo di circa 40 mila euro.

Un tool molto impiegato per l'ottimizzazione topologica è Inspire di Altair, è un software di tipo CAE (Computer Aided Engineering), che usualmente parte da un disegno CAD 3D che può essere importato poi su Inspire. Il componente viene suddiviso, in funzione dei vincoli di progetto, in una parte di Design Space, sulla quale il software potrà lavorare per l'ottimizzazione topologica ed una parte di Non Design Space, che individua le zone che devono mantenersi immutate, rispetto il design iniziale, perché ad esempio potrebbero individuare l'accoppiamento con altre parti.

Per l'ottimizzazione topologica vengono simulati ovviamente i carichi ed i vincoli cui la struttura è sottoposta ed si effettua secondo dei criteri ben precisi che potrebbero essere la massimizzazione della rigidità della struttura così come la minimizzazione della massa, potendo anche inserire i fattori di sicurezza da rispettare o la percentuale di massa accettata. Il software restituisce una geometria ancora modificabile mediante una parte CAD free form, che consente di creare geometrie non parametrizzabili, mediante la quale il progettista può liberare la propria creatività. Infine si possono realizzare analisi agli elementi finiti, che risolvono per noi le matrici strutturali per calcolare spostamenti e stress cui la struttura è soggetta.

In Figura 39 si può vedere il workflow seguito sul software di Altair, Inspire, dall'importazione del CAD 3D alla realizzazione del componente a seguito dell'ottimizzazione topologica.

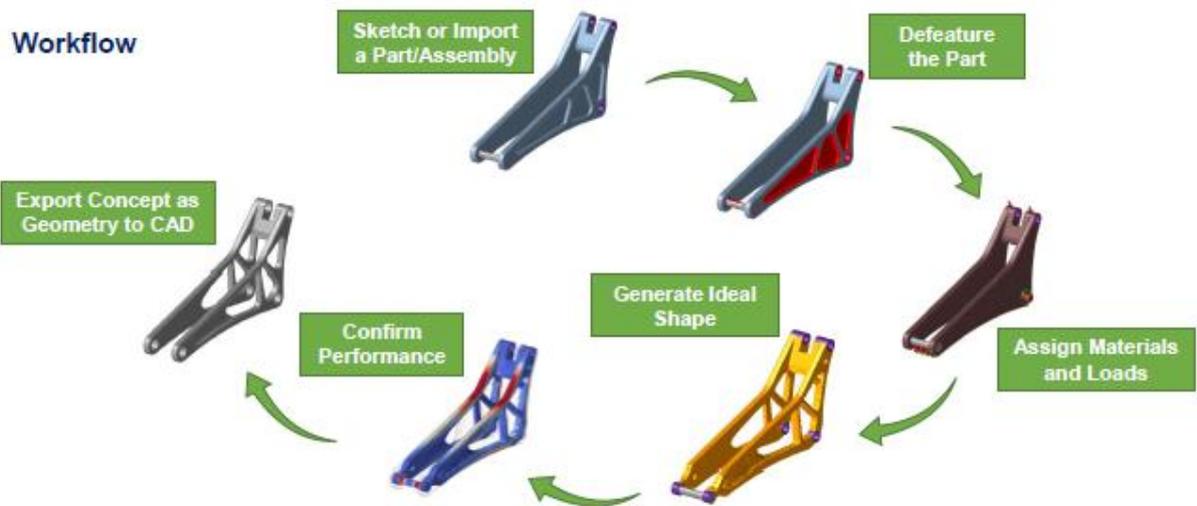


Figura 39: Workflow del processo seguito su Inspire [4]

1.2.3 Design for Additive Manufacturing: DFAM

Mediante la fabbricazione additiva è possibile realizzare componenti che sono progettati per essere costruiti con le tecnologie di produzione tradizionali, come ad esempio prototipi o parti di ricambio; oppure oggetti che necessitano un progettazione dedicata per l'additive manufacturing, per produrre per esempio componenti definitivi o stampi particolari con canali conformali. In quest'ottica si parla di Design For Additive Manufacturing o DFAM.

I principi alla base della DFAM sono stati tracciati da alcuni ricercatori, Hague et al.,2003; Iuliano et al., 2004; Beacker et al.,2005; così come è stato definito lo scopo della progettazione per la fabbricazione additiva: *“ La massimizzazione delle prestazioni del prodotto attraverso una sintesi delle forme, dimensioni, strutture gerarchiche e composizione del materiale soggetta al potenziale delle tecnologie additive”*. [2]

I vantaggi principali dell'additive manufacturing, che devono essere considerati dai progettisti che si avvicinano al DFAM sono:

1. Possibilità di avere sottosquadri, spessori di parete variabili e canali profondi e di geometria complessa;
2. Possibilità di realizzare oggetti di forma geometrica illimitatamente complessa, con geometrie contorte e svergolate, fori ciechi e filettature o viti con un elevato rapporto resistenza/peso;

3. Possibilità di ridurre il numero delle parti, costruendo ad esempio un componente già assemblato, integrando giunti e cerniere.

È importante ricordare che, nonostante la fabbricazione additiva permetta di realizzare forme complesse, bisognerebbe evitarle qualora non necessarie. Per quel che riguarda la creazione di fori ciechi o filettati si può valutare se effettuare solo un pre-foro e dopo provvedere all'allargatura con le tecnologie tradizionali, oppure produrre direttamente il foro successivamente e non in additive manufacturing.

Si deve anche prevedere, nel CAD del componente riprogettato, la presenza di sovrametallo che ha la duplice funzione consentire le successive lavorazioni come la lucidatura e di gestire le eventuali deformazioni che si possono generare a causa della stampa o nel post processing ad esempio durante il trattamento di distensione.

La progettazione per la fabbricazione additiva può presentare diversi obiettivi:

- Minimizzazione del peso;
- Massimizzazione delle caratteristiche meccaniche
- Ottimizzazione del comportamento dinamico;
- Ottimizzazione delle prestazioni termiche;
- Riduzione del numero di componenti;
- Integrazione di funzioni in un unico elemento.

Tali finalità possono essere applicate simultaneamente su tutto il componente, oppure si potrebbe pensare di implementare ad esempio le prestazioni meccaniche in una determinata parte ed il comportamento dinamico in un'altra.

La metodologia che sta alla base del Design For Additive Manufacturing prevede tre step fondamentali:

1. Analisi del comportamento meccanico del componente originale;
2. Ottimizzazione topologica;
3. Post-processo.

Se si parte da un componente che deve essere riprogettato seguendo il DFAM, in primo luogo si deve prevedere uno studio di fattibilità nelle tecnologie additive, occorre per esempio chiedersi se presenta delle dimensioni compatibili con le attuali macchine di stampa 3D e se

può essere concretamente realizzato in fabbricazione additiva. Dopodiché si verifica il comportamento meccanico del componente, al fine di individuare lo stato tensionale e di deformazione al quale è soggetto, ciò ha lo scopo di conoscere le caratteristiche del pezzo al fine di impostare correttamente il modello agli elementi finiti che verrà poi impiegato per l'ottimizzazione topologica. Una prima verifica di massima serve anche per definire il corretto spazio di progettazione sul quale il software andrà poi a lavorare nella fase successiva di ottimizzazione. Questa fase è cruciale anche perché il passaggio dalle tecnologie tradizionali a quelle additive implica molto spesso un cambiamento del materiale, con caratteristiche meccaniche differenti.

Lo step dell'ottimizzazione topologica servirà a posizionare, all'interno dello spazio di progettazione, dove il materiale dovrà essere necessariamente presente, in funzione degli obiettivi della progettazione e dei vincoli progettuali. Individuare correttamente lo spazio di progettazione è fondamentale, esso rappresenta il massimo volume che l'oggetto può occupare, senza eventualmente creare interferenze con altri elementi. In questa fase si sceglie anche il processo di AM più adatto per la produzione ed il materiale, infatti ad oggi non tutti i materiali possono essere impiegati per la fabbricazione additiva, quindi si deve scegliere il più idoneo che riesca a sopportare i requisiti imposti. Questa fase si conclude con l'ottimizzazione topologica vera e propria e con la scelta della geometria più opportuna, si tratta però di un volume che era stato discretizzato in una mesh triangolare, in cui è stato rimosso una parte di tale volume, quindi il risultato non sarà una superficie matematica, ma un file STL.

Infine vi è la fase di post-processo, svolta sempre dal software che consiste nella modellazione CAD della geometria ottimizzata, mediante superfici libere e la verifica, sempre mediante analisi agli elementi finiti, del comportamento meccanico del componente riprogettato.

Il flusso di lavoro seguito per il DFAM si può schematizzare come in Figura 40.



Figura 40: Flusso di lavoro DFAM

1.3 Tecnologie a letto di polvere

Nell'ambito dei materiali metallici, tra le varie tecniche di fabbricazione additiva, spiccano le cosiddette tecnologie a letto di polvere, così chiamate perché la sorgente termica o il collante agisce solidificando o aggregando selettivamente la polvere distesa su una piattaforma.

Le tre tecnologie di cui discuteremo sono la 3 Dimensional Printing, introdotta già nel caso dei materiali polimerici, la Selective Laser Melting (SLM) e l'Electron Beam Melting (EBM). La prima ha come materiale di partenza la polvere, ma fa uso di un collante per aggregare le particelle, mentre le altre due impiegano una sorgente termica che porta a fusione lo strato di polvere, nel caso della SLM si ha un sorgente laser, mentre per l'EBM un fascio di elettroni.

Per queste due tecnologie inoltre si può parlare anche di una progettazione dedicata che tenga in conto dei fattori che influenzano la stampa di un componente, tra cui la qualità superficiale piuttosto che la velocità di produzione ed il delicato argomento relativo ai supporti.

1.3.1 Le polveri metalliche

La produzione della materia prima per lavorare con le tecnologie a letto di polvere è al momento costosa, perché richiede, tra le altre cose, anche un personale estremamente qualificato, inoltre i sistemi di produzione sono di recente sviluppo ed ingegnerizzazione. Le polveri destinate alla fabbricazione additiva devono presentare stringenti proprietà, tra cui una geometria più sferica possibile ed una granulometria molto controllata, perché proprio dalla qualità della polvere dipende la possibilità di avere, alla fine del processo di stampa, un componente totalmente privo di difetti.

Immaginiamo un laser che passa sul letto di polvere, l'efficacia del passaggio nella generazione di una struttura densa, dipende anche da quanto le particelle di polvere sono ben impacchettate sulla superficie, se sono molto vicine le une alle altre a seguito della loro fusione il liquido si spande correttamente e bagna il solido creando una continuità. La condizione ottimale non è quella di avere particelle tutte della stessa dimensione, ma è preferibile che ci siano anche particelle più piccole, che riescano ad inserirsi nei vuoti lasciati da quelle più grandi.

Una polvere adatta per AM deve permettere il più possibile il riempimento dello strato steso dalla racla, che nel suo passaggio non deve incontrare ostacoli, ecco perché le polveri sferiche devono anche poter rotolare su loro stesse e sullo strato precedente, questa proprietà prende il nome di flowability.

Altre caratteristiche della polvere che impattano sulle qualità del componente finale, oltre la flowability, la distribuzione granulometrica e la densità apparente, sono:

- La composizione chimica, nella quale si considera non solo la percentuale degli elementi caratterizzanti la lega, ma anche delle impurità;
- La presenza di difetti, ad esempio se le particelle non sono sferiche, se si formano satelliti o aggregati, polveri non abbastanza dense, in quanto la gas atomizzazione potrebbe creare delle sferette vuote al loro interno.

Per avere un'idea riguardo il costo della lavorazione delle polveri si può fare un confronto tra un lingotto di 1 kg in lega di titanio, Ti6-4, che costa circa una decina di euro, ed 1 kg di polvere della medesima lega gas atomizzata, che arriva a costare mediamente 250 euro. [5]

In generale la produzione di polveri metalliche è un mercato molto ampio, rispetto a quello dell'additive manufacturing, la differenza è legata ai requisiti molto stringenti che le polveri destinate alle tecnologie additive devono presentare, quindi il loro valore aggiunto. Nel caso della metallurgia delle polveri anche le proprietà meccaniche saranno inferiori, il processo per la realizzazione della polvere sarà più economico e a parità di materiale una polvere generica arriva a costare sotto i 100 euro al kg.

La produzione delle polveri metalliche può essere schematizzata in 3 step, come rappresentato in Figura 41:

1. Produzione del lingotto metallico;
2. Produzione della polvere metallica;
3. Post-processing e validazione della polvere.

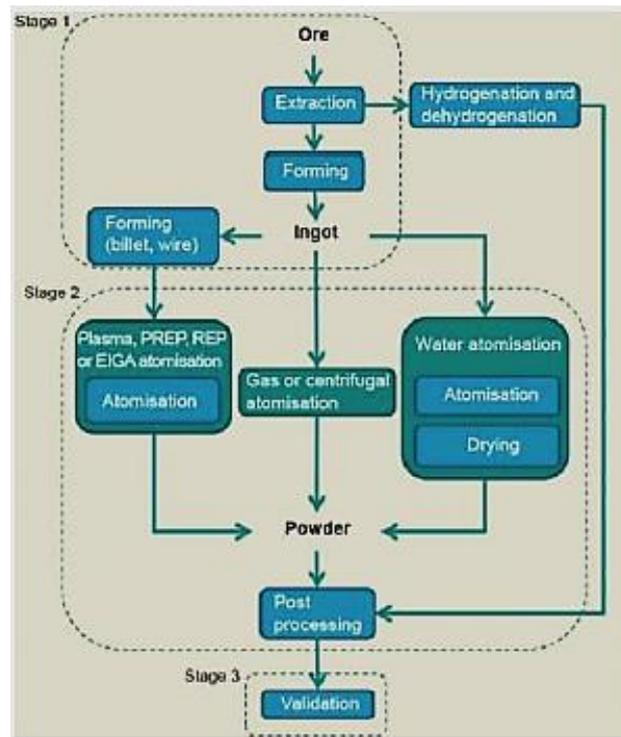


Figura 41: Processo di produzione delle polveri per AM [5]

Il punto di partenza è l'estrazione della materia prima e tramite processi fusori si passa alla creazione del metallo puro o della lega per successiva realizzazione del lingotto.

Il secondo step prevede il processo di atomizzazione che porta alla formazione delle polveri, esistono tre tecniche differenti:

- Water atomisation;
- Atomizzazione gas o centrifuga;
- Atomizzazione al plasma.

Le prime due sono le più usate, soprattutto dai produttori indirizzati a grandi quantità perché le più economiche, tuttavia vanno bene per quei metalli meno propensi all'ossidazione. La water atomization è il sistema con il quale si produce la stragrande maggioranza delle polveri per la metallurgia, è poco indicato per le polveri in ambito AM perché la qualità chimica non è sempre soddisfacente, il processo è schematizzato in Figura 42: Processo di water atomization.

[5]

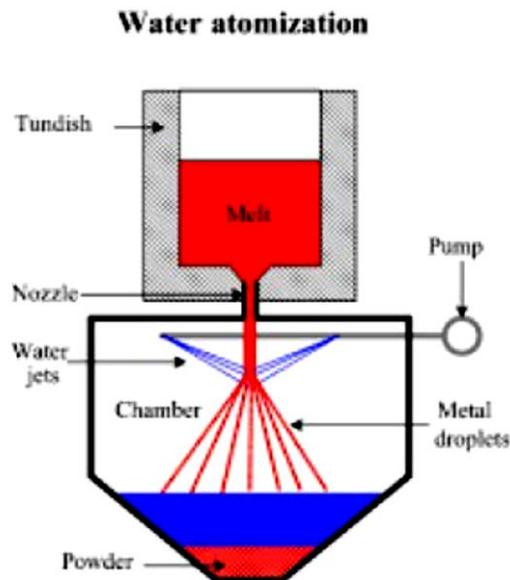


Figura 42: Processo di water atomization

Il sistema è costituito da una tramoggia, all'interno della quale si trova il metallo liquido, che termina con un ugello in cui il flusso è accelerato insieme a flussi di gas umido. L'accelerazione polverizza il flusso liquido che viene poi raffreddato mediante l'ausilio di spruzzi di acqua, il raffreddamento è molto rapido e non si riesce ad ottenere un grandissimo controllo granulometrico, inoltre la particella non avrà il tempo di solidificarsi nella forma termodinamicamente più stabile, cioè la sfera, ma sarà più allungata. Le particelle essendo più pesanti dell'acqua precipiterà al fondo della camera depositandosi.

Questa tecnologia tipicamente genera un gran numero di particelle che non sono esattamente sferiche, quindi è limitata l'applicazione delle polveri ottenute nell'ambito dell'additive manufacturing. A questo si va a sommare il fatto che l'acqua reagisce con molti metalli e quindi la parte superficiale delle particelle potrebbe essere chimicamente alterata. Un altro svantaggio è relativo al post processing, che viene ulteriormente complicato dalla presenza di polveri bagnate, che prima di essere suddivise andranno asciugate.

Un vantaggio della water atomization è che, impiegando battenti molto elevati e quindi una pressione sull'ugello importante, si possono produrre polveri molto fini, di dimensioni anche pari a 2-3 μm . Per la fabbricazione additiva non sempre è un bene avere particelle così piccole perché più la polvere è fine più il contributo delle forze di natura elettrostatica superficiali diventa grande, ciò comporta un'aggregazione delle particelle che formano i cosiddetti satelliti, che peggiora le qualità di flowability della polvere.

Oggi quasi tutti i processi produttivi di polveri per l'additive manufacturing fanno uso della gas atomizzazione. Le strutture sono comprensive: del forno fusorio, del sistema di atomizzazione e di un sistema di raffreddamento studiato per superare i problemi della water atomization, in particolar modo per evitare la presenza di elementi che possano reagire con la polvere, un maggior controllo termico sulle polveri, ossia una solidificazione più lenta che permetta la stabilizzazione nella forma sferica.

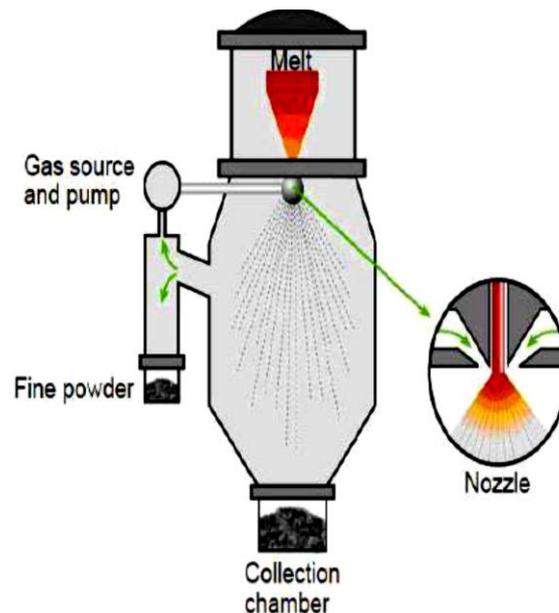


Figura 43: Processo di gas atomizzazione [5]

Il raffreddamento con gas inerte consente di processare un ampio range di materiali e di ottenere delle particelle sferiche, in quanto il gas permette di gestire con maggiore lentezza il processo di solidificazione. Con questa tecnologia si arriva a produrre il 60% di polvere utilizzabile per i processi di AM, con un range di dimensione tra 20 e 100 μm , la polvere di dimensione superiore verrà impiegata nel mercato della metallurgia delle polveri. [5]

L'atomizzazione centrifuga rappresenta un'alternativa al sistema con ugelli, che fa uso della forza centrifuga per disperdere il metallo fuso e realizzare particelle sferiche.

L'atomizzazione al plasma, rappresenta in Figura 44: Processo di atomizzazione al plasma, ha la limitazione di dover partire da un metallo sotto forma di filo e non da un lingotto o da pezzi massivi, spesso però non tutti i metalli possono essere trafilati, quelli fragili e poco tenaci si spezzano. La fonte termica anziché essere un forno ad induzione è un flusso di plasma caldo, ossia un flusso di ioni caldi che viene "sparato" per differenza di potenziale contro il metallo che fonde. Il plasma è in grado di gestire grandissime quantità di energie con spot piccolissimi,

per questo motivo non è pensabile fondere lingotti di grandi dimensioni, si può partire da particelle, in tal caso si parla di sistema di sferoidizzazione o da fili.

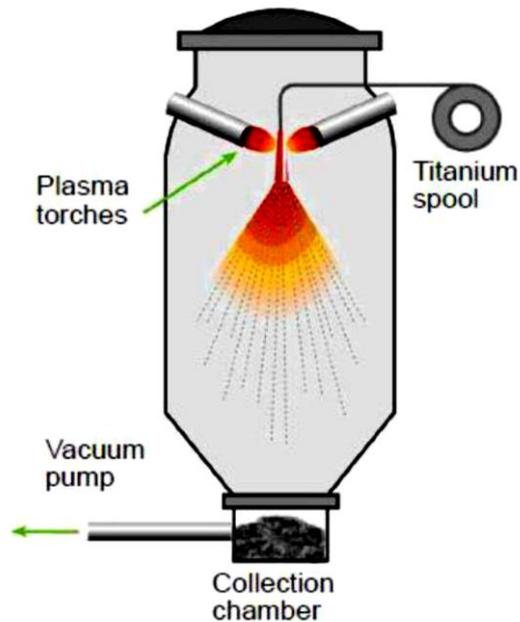


Figura 44: Processo di atomizzazione al plasma [5]

Le dimensioni delle particelle ottenute vanno da 0 a 200 μm , tra i vantaggi si ha la possibilità di avere polveri molto sferiche in quanto si riesce a gestire la velocità di raffreddamento. Un ulteriore vantaggio riguarda il consumo di gas inerte che rispetto ai precedenti processi si riduce di 1/3. L'atomizzazione al plasma è principalmente impiegata per la lavorazione della lega di titanio Ti6-4, che è particolarmente sensibile alle impurità, il titanio infatti ha un'energia libera di formazione degli ossidi e dei carburi molto bassa, è instabile, quindi se ha la possibilità reagisce per crearli.

Avvenuta l'atomizzazione e quindi la creazione delle polveri, si passa alla fase di post processing, in cui le polveri vengono vagliate e suddivise nelle varie classi granulometriche, dalle più fini alle più grossolane, mediante setacci con mesh via via crescente, solitamente si usano sistemi a vibrazione meccanica. Tale suddivisione è fondamentale poiché a seconda della tecnica additiva sono richieste dimensioni delle polveri differenti, in Tabella 1 è stata fatta una distinzione della dimensione della polvere in funzione del processo di AM scelto.

| Processo AM | Dimensione della polvere |
|-------------|--------------------------|
| SLM/ DMLS | 15 – 45 μm |
| DED/LENS | 25 – 45 μm |
| EBM | 45 – 100 μm |

Tabella 1: Dimensione della polvere in funzione della tecnologia AM

L'EBM ammette particelle con una dimensione maggiore, perché la potenza del fascio di elettroni è superiore rispetto alla potenza del fascio laser del SLM, processo che dunque richiederà particelle più piccole. Discorso a parte prevede la tecnologia DED che non presenta un letto di polvere, ma quest'ultima dovrà attraversare l'ugello e sarà fusa dal laser non appena arriva sulla superficie già deposta. In questo caso notiamo un range di dimensione più ristretto rispetto agli altri due processi, perché si dovrà fare attenzione che la polvere abbia la granulometria corretta per non intasare l'ugello e per essere fusa nel momento giusto, cioè non prima che raggiunga lo strato precedentemente deposto.

Infine l'ultimo step prevede la validazione della polvere, al fine di avere un certificato che garantisce al cliente che sono stati effettuati tutti i controlli fondamentali.

Tra i materiali metallici disponibili per la fabbricazione additiva si hanno:

- Leghe di alluminio, tra cui AlSi10Mg, Scamallo, AlSi12;
- Leghe a base di cobalto;
- Acciai per utensili, come AISI 420 o Marage 300;
- Leghe a base di nichel, tra cui si ricorda l'Inconel 718, Hastalloy X;
- Acciai inossidabili, come SS 316 L e 15-5 PH;
- Leghe di titanio, come il Ti6Al4V, comunemente detto Ti6-4, la sua versione ELI e la lega TiAl6Nb7;
- Metalli preziosi: l'oro 18 carati e l'argento 930;
- Leghe in rame.

1.3.2 3 Dimensional Printing

Tra le tecniche per la fabbricazione additiva che partono da polvere, la 3 Dimensional Printing è quella caratterizzata dal materiale del componente più un legante, così come il processo per i materiali polimerici e ceramici.

Il collante viene depositato selettivamente sul letto di polvere mediante una testina di stampa multi ugello, per velocizzare la fase di deposizione, le goccioline di collante impattano sulla polvere aggregandola. Successivamente si ha il passaggio della sorgente ad infrarosso che serve a solidificare il collante, non avendo un gradiente termico non si genera una forte compattazione delle polveri, quindi il componente che viene estratto dalla macchina deve essere maneggiato con cura per le fasi di pulizia.

In questo caso non si genera un componente finito ma è necessario un trattamento successivo che può essere di sinterizzazione o di infiltrazione. Il trattamento di infiltrazione è un processo termico effettuato sottovuoto in cui il collante viene fatto evaporare ed al suo posto è inserito un metallo basso fondente come il bronzo, che essendo molto scorrevole riesce a riempire tutte le cavità lasciate libere dal collante, come si può osservare in Figura 45. [2]

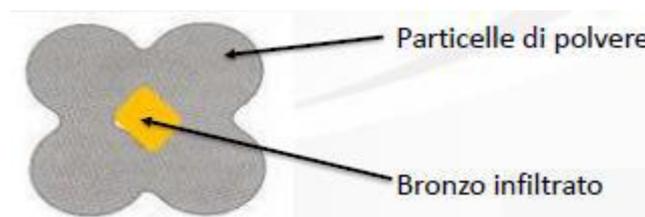


Figura 45: Particelle di polvere con infiltrazione di bronzo

Alla fine del processo si ottiene un composto metallico, ragion per cui questa tecnica è applicata principalmente per la prototipazione funzionale o per la creazione di stampi pre-serie, ma non per componenti definitivi.

Se non si volesse infiltrare è anche possibile fare un trattamento termico di sinterizzazione, che permette di realizzare il componente nel materiale definitivo, ma tale trattamento prevede una contrazione volumetrica, di cui bisogna tenerne conto in fase di progettazione.

I vantaggi della tecnica 3DP, se paragonata ad SLM ed EBM, sono: produttività più elevata e supporti non necessari, poiché è la polvere che sostiene il pezzo; il limite principale è caratterizzato dal materiale che non può essere definitivo.

1.3.3 Selective Laser Melting (SLM)

Tra le tecnologie a letto di polvere, la Selective Laser Melting gioca un ruolo cruciale, insieme all'EBM, per la produzione di componenti definitivi.

Storicamente quando le sorgenti laser non erano molto potenti per portare a fusione le particelle di polvere metalliche, ma si riusciva solamente a sinterizzarle, si usava la dicitura di Selective Laser Sintering, SLS. Attualmente tra SLM e SLS non si ha più alcuna differenza e le due tecnologie rappresentano lo stesso processo di fusione laser selettiva.

Il processo è schematizzato in Figura 46. [2]

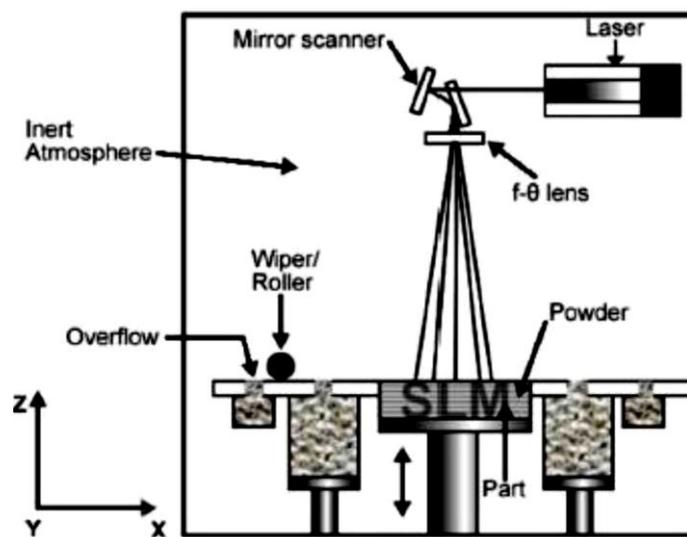


Figura 46: Processo SLM

Il componente cresce sulla piattaforma di lavoro, che è dotata di un elevatore che si muove lungo l'asse z. Ai lati della piattaforma si hanno due contenitori che contengono la polvere che deve essere stesa e due contenitori di ricircolo (overflow) e di recupero, infine vi può essere un rullo o una lama, detta anche racla, che serve a posizionare la polvere sulla piattaforma di costruzione.

Nella parte superiore è presente la testa laser che è fissa, in quanto la radiazione laser viene direzionata e concentrata da una serie di specchi e da una lente f-θ, che ha il compito di renderla perpendicolare al piano di lavoro, tale lente è efficace al centro un po' meno ai lati.

Il rullo o la lama deposita la polvere sulla piattaforma, il laser opportunamente focalizzato fonde in modo selettivo le particelle di polvere, aggregandole, l'elevatore scende di una quantità pari allo spessore dello strato e la polvere viene nuovamente depositata dal rullo per

ricominciare il processo. È fondamentale che il laser fonda parzialmente anche lo strato precedente per garantire l'adesione tra due strati successivi.

Si lavora in atmosfera inerte, di solito si impiega l'azoto per gli acciai e l'argon per leghe più reattive, come quelle di titanio e alluminio, perché lavorando in forte carenza di ossigeno si riesce ad evitare l'ossidazione della polvere di metallo, che è portata ad elevate temperature dal laser. Per le leghe più reattive si devono evitare esplosioni ed incendi, che possono essere innescate quando particelle di dimensioni piccolissime (50 μm) di lega di titanio o di alluminio, che sono infiammabili, entrano a contatto con l'aria, per cui anche lo stoccaggio di tali polveri dovrà richiedere qualche accorgimento in più.

In teoria il letto di polvere dovrebbe riuscire a supportare il pezzo ma si deve considerare che la camera si trova a temperatura ambiente, infatti essa non è riscaldata, al massimo può esserlo la piattaforma con temperature intorno ai 100-150°C. La polvere dunque è a temperatura ambiente, viene fusa raggiungendo gli 800°C nell'intorno dello spot del laser ed in pochi millisecondi è raffreddata, dalla polvere circostante, nuovamente fino alla temperatura della camera. Il gradiente termico è elevatissimo quindi per evitare che una sezione ad esempio a sbalzo si deformi sono necessari dei supporti che la ancorino, facendola aderire stabilmente alla piattaforma. Se il componente fosse privo di supporti per effetto del ritiro una sezione si solleva e nel passaggio successivo della racla per distendere il nuovo strato di polvere, la racla urta con la sezione deformata. In generale questo processo comporta un componente particolarmente tensionato, ragion per cui sono necessari successivi trattamenti termici di distensione.

La radiazione laser fonde completamente le polveri metalliche e se il processo è ben controllato le porosità sono assenti, così come i difetti interni, quindi a seguito della ri-solidificazione la densità del componente è prossima al 100%.

In Figura 47 si possono osservare due micrografie di due sezioni di uno stesso campione, a sinistra è rappresentata la sezione "as built", ossia come viene fuori dopo il processo di stampa; a destra invece è raffigurata la sezione dopo il trattamento termico. In quest'ultimo caso si nota come la sezione sia perfettamente uniforme, priva di difetti, con porosità residua bassissima e densità prossima al 100%.

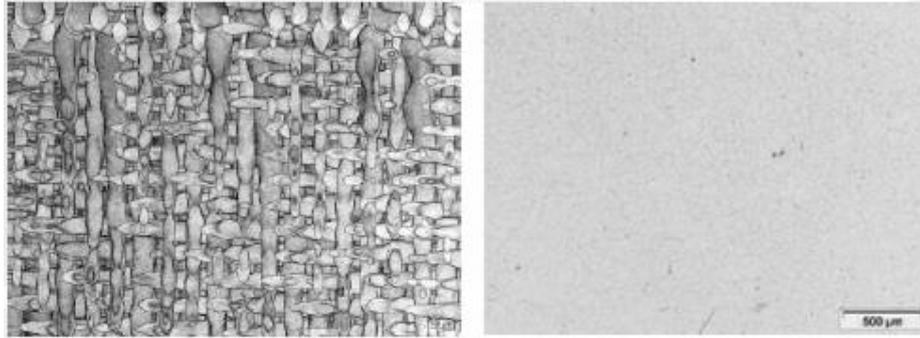


Figura 47: Micrografie di una sezione prodotta in SLM, a sinistra as built, a destra dopo trattamento termico di distensione [5]

L'energia termica necessaria alla fusione è fornita da una sorgente laser che sfrutta come mezzo attivo un gas di CO₂ oppure in alternativa un cristallo d'ittrio e alluminio drogato (Nd-Yag).

La fusione e la successiva rapidissima solidificazione consentono di ottenere caratteristiche meccaniche e metallurgiche dei componenti prodotti in SLM migliori di quelle ricavabili con le lavorazioni tradizionali, in quanto il raffreddamento quasi istantaneo crea una struttura a grani molto fini. I componenti che necessitano di proprietà di resistenza termica alle alte temperature e al creep vengono trattati termicamente per ingrandire i grani cristallini.

I forti gradienti di temperatura e il ritiro durante il raffreddamento, inducono nello strato solidificato delle dilatazioni e contrazioni termiche cicliche che possono superare la massima deformazione elastica del materiale, generando delle cricche. Per evitare la loro formazione si può ridurre lo spessore della sezione, infatti all'aumentare di quest'ultimo aumenta la formazione delle cricche, questo spiega il perché lo spessore di strato per questa tecnologia viene mantenuto a qualche centesimo di mm.

Oltre alle già citate tensioni residue, i tipici difetti associati a questo processo sono:

- Possibile porosità della parte;
- Polveri residue;
- Layer disgiunti;
- Il Balling, fenomeno che consiste nella formazione di sfere di dimensioni circa pari al diametro del fascio laser, che possono provocare una traccia fusa discontinua e conseguente scadente finitura superficiale.

La piattaforma di costruzione deve essere dello stesso materiale del componente, al fine di ottenere una maggiore adesione, così come i supporti, che sono necessariamente dello stesso materiale perché stiamo lavorando all'interno di un letto di polvere. Per ciò che riguarda la rimozione dei supporti, non sempre è agevole ed in genere si procede con la tecnica della elettroerosione a filo e, solo successivamente si prosegue con la rimozione manuale, facendo attenzione a non danneggiare il componente.

I componenti prodotti mediante SLM sono assimilabili ai getti ottenuti con la microfusione, la tecnica di fonderia più precisa. La fabbricazione additiva per i materiali metallici non è una soluzione sostitutiva alle lavorazioni per asportazione di truciolo ma è in concorrenza con la fonderia e la deformazione plastica. Al pari di esse non è possibile conseguire tolleranze e rugosità superficiali paragonabili a quelle ricavabili con le tecnologie convenzionali, quindi nelle zone di accoppiamento è sempre indispensabile prevedere un sovrametallo di 0.5 - 1 mm. E' necessario effettuare trattamenti termici per l'eliminazione delle tensioni interne indotte dal processo di costruzione, così come per la fonderia o per qualsiasi altra lavorazione tradizionale. Per quanto riguarda i supporti, è vero che non è semplice la loro rimozione, ma anche in fonderia si devono ad esempio togliere le materozze o le bave.

Con l'additive manufacturing si ha però la possibilità di ottenere geometrie non realizzabili con le lavorazioni tradizionali.

Sempre paragonandola al processo di fonderia, un altro vantaggio del SLM è sicuramente un minor consumo energetico, ad esempio per fondere un componente di dimensioni 200x200x200 mm servono 5KW, mentre in fonderia, a parità di dimensione, serve qualche MW. Da un punto di vista metallurgico abbiamo detto che si ottengono grani uniformi, tutti uguali e di piccole dimensioni, quindi con trattamenti termici è possibile ingrandirli a piacere, così da regolare le proprietà meccaniche. Il processo inverso di rimpicciolire i grani a piacimento a partire da una struttura metallurgica a grani grossi non è così semplice.

I grani sono tutti uguali e fini perché il processo è localizzato allo spot del laser, in fonderia invece i grani non sono uniformi, ma piccoli all'esterno dove lo scambio termico è più agevolato, e grandi nel cuore, in cui lo scambio termico avviene più lentamente.

La tecnica della fusione selettiva laser è vero che è un processo di fusione, ma sotto certi aspetti è assimilabile ad una saldatura, intesa come unione di particelle. Tale tecnologia infatti

funzione bene con leghe saldabili, un po' meno con le leghe non saldabili, come ad esempio l'alluminio della serie 7000.

I materiali metallici maggiormente impiegati per il processo SLM possono essere riassunti nel seguente elenco:

- Lega di alluminio AlSi10Mg;
- Leghe di cobalto cromo;
- Acciai per stampi ed inox;
- Lega di titanio Ti 6-4;
- Inconel 625 ed Inconel 718;
- Leghe di oro.

Le polveri del letto che non sono state interessate dalla fusione, possono essere riutilizzate, infatti nella macchina ci sono dei contenitori atti al riciclo delle polveri, spesso più sono usate più perdono umidità. Inoltre è bene che siano di forma più sferica possibile per facilitare la loro distensione ed evitare problemi con la racla.

Ogni materiale interagisce diversamente con la radiazione laser, per questo motivo dovrà essere lavorato in macchina con un diverso set di parametri, che è stato ottimizzati proprio per controllare correttamente il processo e garantire una densità del componente finale prossima al 100%. I parametri base che è possibile regolare in una macchina per l'additive manufacturing per materiali metallici, sono:

1. La potenza della sorgente;
2. Il tempo di esposizione, che indica la velocità con cui passa la sorgente termica sulla superficie, ovviamente all'aumentare del tempo di esposizione aumenta anche la potenza rilasciata sul componente;
3. Hatch distance, rappresenta la distanza tra due passate adiacenti, si può considerare lo spessore dello strato come l'equivalente del hatch distance ma sull'asse z. Tale parametro determina anche il grado di sovrapposizione del passaggio della sorgente;
4. Point distance, individua la distanza tra due spot impulsivi del laser, infatti esso, sebbene sia continuo, è il risultato di tanti impulsi successivi della sorgente. Questo parametro rappresenta una distanza perpendicolare al hatch distance nel senso di percorrenza del laser.

È possibile individuare gli ultimi due parametri in Figura 48. [5]

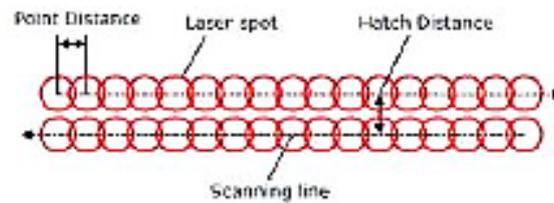


Figura 48: Hatch distance e Point distance

In Tabella 2 è possibile osservare i range tipici entro cui i parametri base possono variare:

| Parametri base | Tipici range |
|----------------------|------------------|
| Potenza Laser | 160 – 200 W |
| Tempo di esposizione | 60 – 150 μ s |
| Hatch Distance | 80 – 150 μ m |
| Point Distance | 50 – 80 μ m |

Tabella 2: Tipici valori dei parametri di base

Le applicazioni della tecnologia SLM prevedono non solo la prototipazione, ma anche la produzione di componenti definitivi, soprattutto nei settori industriale, aerospaziale e biomedicale. L'SLM è impiegata anche per la produzione di stampi, il loro ruolo è quello di assicurare la forma finale e di estrarre correttamente il calore, il tempo di raffreddamento è essenziale per i materiali polimerici perché i gradienti termici producono ritiri non omogenei. Nel caso di geometrie da produrre particolarmente complesse, il vantaggio di costruire lo stampo in AM, rispetto alle tecnologie tradizionali, è quello di poter realizzare canali interni per il raffreddamento, che seguono perfettamente la forma dello stampo, in questo modo si riesce a controllare il gradiente termico, i ritiri e si riduce il tempo di raffreddamento. Questa attività comporta un costo aggiuntivo di circa il 10-15% in più, ma consente di ridurre il tempo ciclo del 40-60%; spesso allora si propende per una soluzione ibrida in cui le parti più complesse con i canali conformali di forma arzigogolata vengono prodotte in SLM, la parte semplice dello stampo invece è ottenuta mediante le tecnologie tradizionali.

1.3.4 Electron Beam Melting

L'Electron Beam Melting è una tecnica di AM a letto di polvere, in cui la fusione delle particelle avviene mediante un fascio di elettroni. È meno diffuso della fusione selettiva laser, ma ha trovato un grande sviluppo nell'ambito della produzione delle palette delle turbine del 6° e 7° stadio dei motori di aeromobili.

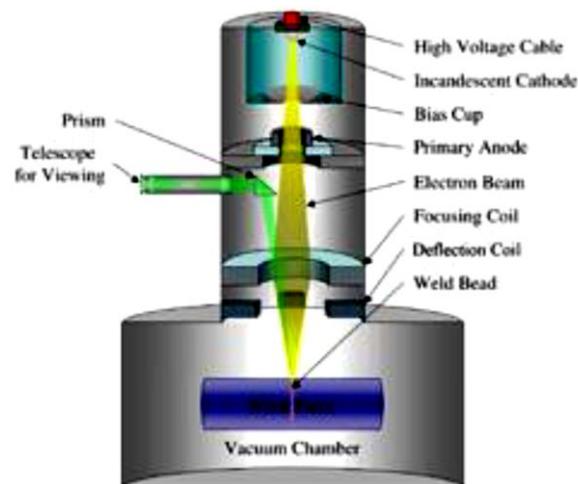


Figura 49: Schematizzazione macchina per EBM

Il processo, sotto certi aspetti, ricorda quello della fusione selettiva laser. Inizialmente utilizzando la sorgente a fascio di elettroni si effettua un preriscaldamento di tutta l'area di lavoro ad una temperatura di circa 800°C, dopodiché si ha la fusione della sezione desiderata, il preriscaldamento fa sì che la polvere si compatti molto, infatti all'estrazione si avrà un blocco di polvere all'interno del quale è contenuto il componente.

Il generatore di elettroni è un filamento di tungsteno che viene riscaldato ad una temperatura superiore ai 2500 °C, in seguito gli elettroni emessi vengono accelerati, attraverso un potenziale anodico di 60kV, fino ad arrivare a 0.1-0.4 volte la velocità della luce.

Il fascio elettronico è comandato da due lenti elettromagnetiche che non sono altro che due solenoidi che permettono di sfocalizzare il fascio, distribuendolo su tutta l'area di lavoro nel momento in cui è richiesto il preriscaldamento dello strato, e di focalizzarlo in una precisa zona quando è necessaria la fusione e conseguente creazione della sezione.

Dal punto di vista meccanico è una macchina estremamente semplice, ci sono pochi movimenti, in quanto il cannone elettronico è fisso e non ci sono parti meccaniche in movimento per la deviazione del fascio. Si ha solo l'elevatore che muove la piattaforma di

costruzione lungo l'asse z e la racla che si muove longitudinalmente per distendere la polvere sul piano di lavoro.

All'interno della camera di lavoro per consentire al fascio di elettroni di lavorare è necessario che ci sia un vuoto molto spinto, altrimenti gli elettroni potrebbero impattare con le particelle di aria e verrebbero deviate. Solitamente si raggiungono valori di pressione di 10^{-3} Pa all'interno della camera, e di 10^{-5} Pa in prossimità del filamento di tungsteno. [2]

È inoltre fondamentale che quando la macchina lavora non si abbiano movimentazioni di materiali metallici nella stanza, in quanto il metallo attrae gli elettroni deviando dunque il fascio. Ad esempio la taratura della macchina viene effettuata posizionando il carrello per togliere il componente finito in un certo modo, ad una certa distanza dalla macchina e lì deve rimanere per tutta la durata della lavorazione, altrimenti se si sposta potrebbe interferire con il fascio di elettroni.

Teoricamente non sarebbero necessari i supporti dato la compattazione delle polveri dovuta al preriscaldamento, inoltre il fascio porta la polvere dagli 800 °C alla fusione, quindi si ha un minor ritiro di solidificazione poiché i gradienti termici sono inferiori, a differenza delle tecniche laser, tuttavia per alcune geometrie è consigliabile mettere i supporti per avere una maggiore stabilità del componente.

Le fasi del processo dell'EBM sono schematizzate in Figura 50. [2]

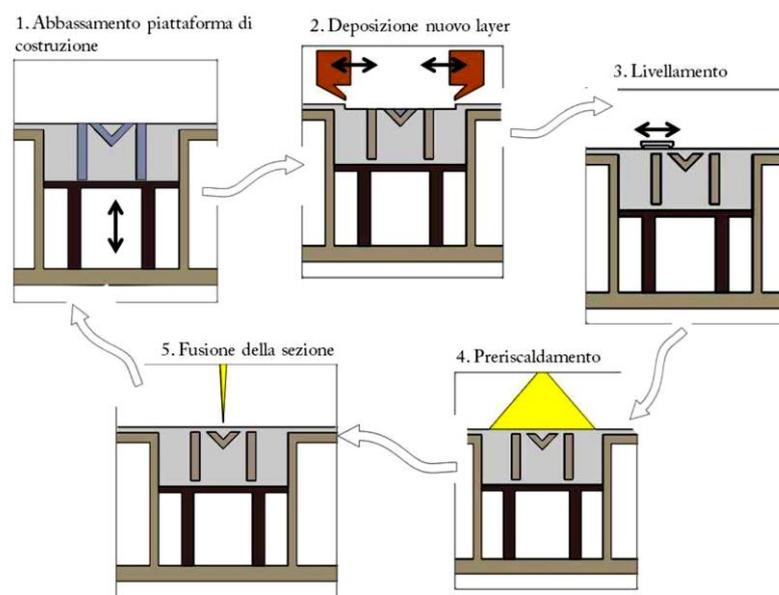


Figura 50: Processo EBM

Si ha prima l'abbassamento della piattaforma di costruzione, la deposizione dello strato di polvere da parte della racla ed il successivo livellamento, il fascio elettronico viene sfocalizzato per preriscaldare lo strato e successivamente viene nuovamente focalizzato per fondere selettivamente la sezione. È importante ricordare che non si effettua un preriscaldamento di tutta la camera di lavoro, ma della singola sezione che di volta in volta poi è processata, le sezioni precedentemente trattate si raffredderanno in modo naturale all'interno della camera.

Se il processo è ben controllato si ha la completa fusione delle polveri, la porosità è assente e la densità è pari al 100%.

Usualmente si adopera uno spessore dello strato compreso tra 0.05 e 0.2 mm, maggiore rispetto al caso del SLM, ciò è possibile per via dei minori ritiri che si verificano a causa degli inferiori gradienti termici tra sezione fusa che sta solidificando e la polvere circostante.

Conclusa la fase di stampa, il blocco compatto, composto da componente più polvere, come illustrato in Figura 51, viene raffreddato sottovuoto o con un flusso di elio, per incentivare il raffreddamento e per estrarre i fumi che si sono creati all'interno della camera a causa dell'umidità presente nelle polveri.



Figura 51: Componente inglobato nel blocco di polvere alla fine della fase di raffreddamento

In genere la fase di raffreddamento è abbastanza lenta in quanto il vuoto non facilita lo scambio di calore, infatti è necessario aspettare parecchio tempo perché la camera torni a temperatura ambiente e possa essere aperta. La produttività di queste macchine quindi è

bassa, anche perché sono nate principalmente con lo scopo di produrre prototipi e sono prive di sistemi di automazione. Si sta cercando di migliorare in questa direzione, anche se il vero problema è la necessità di dover far avvenire il raffreddamento sottovuoto, per evitare contaminazione del metallo che si trova ad altissime temperature.

La fase di rimozione della polvere residua è effettuata mediante il processo di sabbiatura con la stessa polvere impiegata per la stampa. Grazie alla presenza del vuoto in camera le polveri del letto non interessate dal processo di costruzione, possono essere riciclate diverse volte, in quanto non viene alterata la loro composizione chimica né le loro proprietà fisiche, di conseguenza lo spreco di materiale è minimo.

L'Electron Beam Melting è un processo ad alta temperatura di costruzione che garantisce un buon ambiente termico e tensioni residue nel componente veramente basse, inoltre la possibilità di operare sottovuoto consente di eliminare il problema legato alle impurità e di ottenere buone proprietà resistenziali nel materiale.

I fenomeni che interessano il processo sono molti: le caratteristiche del fascio, le qualità della polvere, la strategia di scansione, il controllo del processo. È piuttosto difficile trovare un buon compromesso tra tutti questi parametri al fine di ottenere un componente privo di difetti. L'ottimizzazione del processo ad oggi avviene mediante un meccanismo del tipo "try and error", cioè si fissano i vari parametri di processo e si effettuano delle prove cercando la combinazione migliore. Per scremare alcuni di questi parametri si esegue una sperimentazione estesa e abbastanza lunga, si devono creare dei campioni e su di essi va valutata la densità ottenuta. Tale procedimento risulta poco efficace ed economicamente dispendioso sia perché dipende dal materiale impiegato sia perché i parametri non influiscono in maniera unilaterale ed indipendente. Ad esempio se si aumenta la potenza del fascio elettronico si garantisce una coesione tra i layer ma allo stesso tempo aumenta la probabilità che l'elemento in lega basso fondente possa evaporare.

I materiali adatti ad essere processati con l'EBM sono:

- Leghe di cromo cobalto biomedicale, per l'aerospazio e motorsport;
- Lega di titanio Ti6Al4V e Ti6Al4V ELI;
- Titanio Grado 2;
- TiAl intermetallico.

Si può notare che le leghe di titanio sono quelle maggiormente appropriate per il processo di EBM, e che in genere i materiali sono in numero limitato, ciò è dovuto al fatto che si tratta di una tecnologia che arriva a temperature molto elevate, solo il preriscaldamento è eseguito ad 800 °C, quindi sono esclusi le leghe basso fondenti. In generale le leghe di titanio sono quelle che si processano meglio con le tecniche di fabbricazione additiva (SLM, EMB e DED), il Ti6-4 ha un inizio di comportamento superplastico, è estremamente flessibile e capace di incollarsi su se stesso, infatti si ha difficoltà a lavorarlo con le tecnologie per asportazione di truciolo. Inoltre si ossida facilmente se a contatto con l'ossigeno, per cui in EBM che si lavoro sottovuoto, si riesce ad evitare questo inconveniente.

Se si osserva una micrografia di un componente prodotto mediante l'Electron Beam Melting si può notare una struttura fortemente disomogenea passando dal cuore alle zone esterne, come rappresentato in Figura 52. [2]

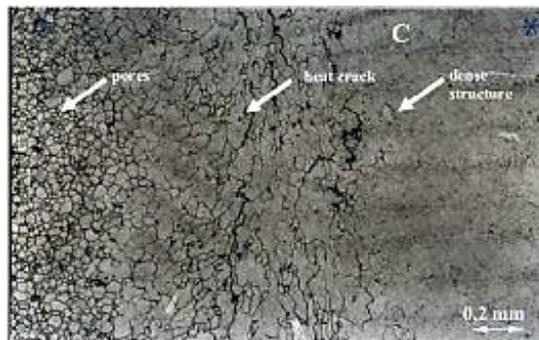


Figura 52: Micrografia di una sezione trasversale di un pezzo prodotto in EBM

Si può notare una struttura densa in corrispondenza del cuore dell'oggetto, una zona ricca di cricche intergranulari ed infine una parte ricca di porosità posizionata verso l'esterno.

Le cricche intergranulari presentano una crescita perpendicolare alla direzione di passaggio del fascio elettronico e nascono a causa delle tensioni termiche dovute a velocità di raffreddamento elevate e differenti per zone. Le porosità invece sono generate da particelle di polvere sinterizzate solo in parte durante il preriscaldamento della sezione o da un eccessivo calore dovuto alla pozza di fusione. Questi difetti provocano una superficie esterna con una scarsa finitura superficiale ed elevata rugosità, quindi a volte è preferibile prevedere un sovrametallo in cui si concentreranno i difetti e che successivamente verrà asportato.

Un'altra tipologia di difetto che si può riscontrare esternamente è la delaminazione della parte, causata da una disuniforme distribuzione di energia che genera dei gradienti di

temperatura all'interno del componente. Un raffreddamento differenziato può indurre delle tensioni interne, ma quest'ultime se superano il limite di coesione degli strati provocano la delaminazione, ossia la separazione tra strati successivi. In particolar modo le tensioni più elevate si riscontrano in corrispondenza dei bordi liberi, dove non solo generano la delaminazione, ma anche un incurvamento dei bordi.

Tale fenomeno è influenzato dalla strategia di scansione e dall'energia del fascio di elettroni, è consigliabile al fine di ottenere una coesione ottimale tra gli strati, di adottare una strategia di scansione che preveda passaggi longitudinali e trasversali in ogni strato, e l'impiego di una densità di energia maggiore. In Figura 53 si può notare come, variando la strategia di scansione si possa migliorare il problema legato alla delaminazione degli strati.

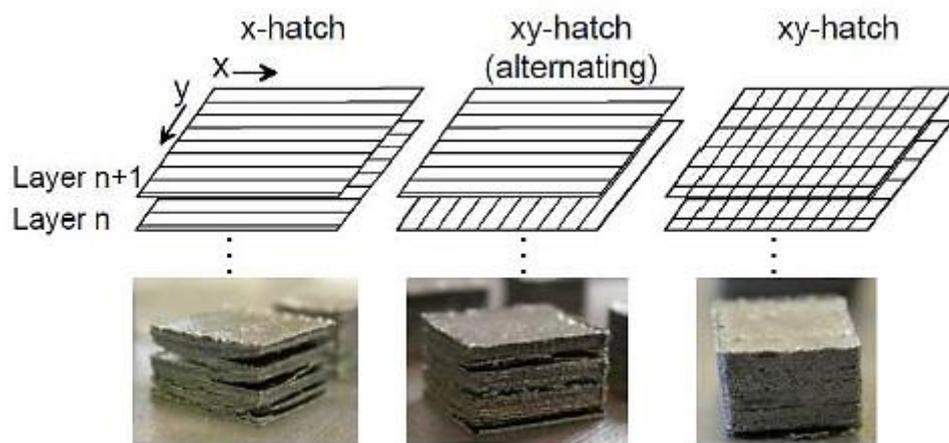


Figura 53: Come la strategia di scansione influenza la delaminazione tra strati [2]

I vantaggi della tecnologia EBM sono:

- Velocità di costruzione elevata;
- Necessità di minori supporti;
- Eccellenti proprietà meccaniche dei materiali;
- Possibilità di saturare il volume di lavoro in altezza;
- Bassi costi operativi.

L'unico vero limite di questa tecnica per l'additive manufacturing è la produttività, poiché una volta conclusa la stampa intercorrono tempi molto lunghi prima di poter ripartire con un nuovo job.

1.3.5 SLM ed EBM a confronto

Entrambe queste tecnologie a letto di polvere presentano dei vantaggi e degli svantaggi che in certi ambiti fanno preferire una tecnica all'altra. Le principali differenze tra l'EBM e l'SLM derivano dalla sorgente termica impiegata, come abbiamo già visto la prima adoperava un fascio di elettroni, mentre la seconda un laser, ossia un fascio di fotoni coerenti.

Il fascio di elettroni presenta un'efficienza ed una densità di energia maggiore rispetto al laser, ciò comporta una elevata profondità di penetrazione, rispetto al processo SLM. Ciò spiega anche il motivo per il quale si possono utilizzare spessori di strato maggiori per l'EBM rispetto al SLM, si passa infatti da strati dell'ordine del centesimo di millimetro al decimo di millimetro. Inoltre anche la granulometria delle polveri ne risente, in quanto per l'EBM possono essere impiegate polveri di dimensioni maggiori, che risultano più economiche.

L'EBM è un processo che si esegue con un vuoto molto spinto, per evitare la deflessione del fascio, mentre l'SLM, che fa uso della sorgente laser non necessita questa accortezza, poiché il fascio laser non ha problemi in presenza di gas, fintantoché quest'ultimo sia trasparente, si lavora con un'atmosfera inerte. La presenza del vuoto però previene dall'ossidazione delle polveri e si riescono a garantire elevate prestazioni meccaniche.

L'uso dei solenoidi per deflettere e focalizzare il fascio elettronico consente un migliore controllo della traiettoria ed una velocità di scansione maggiore, rispetto al sistema di specchi ottici che servono a movimentare il fascio laser.

Lo spot del laser presenta dimensioni inferiori dello spot del fascio elettronico, il che si traduce in un aumento di velocità di produzione, ma di contro si verifica una riduzione della capacità di replicazione dei dettagli.

La quantità di materiali che è possibile processare con SLM è maggiore rispetto ai materiali appropriati per l'EBM, anche se le caratteristiche dell'EBM sono tali per cui è migliore la processabilità della lega Ti6Al4V, inoltre si possono trasformare anche leghe non saldabili.

Nell'EBM si effettua il preriscaldamento della sezione a 800 °C, quindi il gradiente di temperatura cui sottopone il materiale è decisamente inferiore al caso del SLM che passa dalla temperatura ambiente alla temperatura di fusione del metallo con conseguente

tensionamento interno del componente e necessità di eseguire trattamento termico di distensione.

Anche le microstrutture sono differenti l'SLM è un processo più freddo rispetto all'EBM e questo comporta una struttura a grani fini con migliori prestazioni di resistenza meccanica, nell'EBM invece, le temperature maggiori producono grani leggermente più grandi con possibilità di maggiore allungamento a rottura.

La temperatura più elevata del processo EBM provoca anche una maggiore compattazione della polvere, che consente un minor impiego dei supporti, che hanno la sola funzione di aiutare lo smaltimento di calore e non di ancorare il componente alla piattaforma, come nel caso del SLM. Di contro una polvere più compatta non permette la costruzione di canali interni, perché la polvere tenderebbe a rimanere intrappolata al loro interno. Una quantità minore di supporti consente anche la sovrapposizione di più componenti all'interno del volume di lavoro, sempre a favore della produttività della macchina per EBM.

L'SLM garantisce tuttavia tolleranze e rugosità superficiali migliori rispetto all'EBM, in ogni caso non si ottengono tolleranze paragonabili alle lavorazioni per asportazione di truciolo, quindi è sempre bene prevedere del sovrametallo nelle zone di accoppiamento che devono essere rilavorate.

1.3.6 Design for Laser Powder Bed Fusion (L-PBF)

Abbiamo già ampiamente discusso della Design For Additive Manufacturing, ma poiché nel presente lavoro di tesi ci si focalizzerà sulla tecnologia SLM, è bene soffermarsi sulle peculiarità di tale tecnica di AM e valutare come sfruttarle al massimo, tenendo anche conto dei suoi limiti.

La prima domanda che è necessario porsi riguarda la dimensione del componente e la compatibilità con i volumi di stampa delle macchine attualmente in commercio, senza dimenticare la disponibilità del materiale per la tecnologia scelta. Si devono considerare i supporti, perché sono indispensabili per l'SLM, quindi valutare correttamente l'orientamento in macchina al fine di minimizzarli, ricordando però che l'orientamento influenza anche la finitura superficiale dell'oggetto e la produttività.

Progettare per le tecnologie a letto di polvere laser significa creare il modello CAD comprensivo di supporti e già con la più opportuna orientazione in macchina, che tenga conto della funzione obiettivo che si vuole ottimizzare: costo, percentuale di supporti, velocità di produzione, finitura superficiale...

Il design for L-PBF può partire da due concetti fondamentali:

1. Progettazione in base alla forma;
2. Progettazione in base alla lega.

Nel primo caso si deve sostanzialmente tener conto del fatto che ciò che viene progettato per essere creato in una determinata lega non potrà andar bene per un'altra, ad esempio l'Inconel lavorato in SLM subisce determinati stress durante la costruzione a causa dei quale risulta difficile creare determinate geometrie.

Nel secondo caso bisogna scegliere se progettare per migliorare le performance del componente o aumentare la produttività, con conseguente riduzione del lead time e dei costi per singola parte. In quest'ultima prospettiva si deve ancora valutare se la forma è dettata dal processo o se è il design che guida la forma. [2]

Quando si progetta per i processi L-PBF si devono considerare diversi accorgimenti e problematiche nel caso: di superfici inclinate, di fori, di scegliere l'orientamento sulla piattaforma, di strutture snelle ed in generale in tutti i casi in cui servono le strutture di supporto.

Per la tecnica SLM i supporti servono a:

- Fissare il componente alla piattaforma;
- Dissipare l'eccessivo calore;
- Prevenire collapsi e deformazioni.

La rimozione dei supporti è una fase complessa e delicata. Una volta che la stampa è completata il componente viene trattato termicamente per distendere gli stress residui, successivamente si procede alla rimozione dei supporti ed infine si toglie dalla piattaforma. Tuttavia durante lo step relativo ai supporti è di fondamentale importanza capire quale supporto va rimosso per primo, per evitare la deformazione del componente.

Quando si progetta per AM si deve prestare particolare attenzione alle superfici inclinate, cioè quelle superfici che formano un certo angolo rispetto la piattaforma di costruzione. Intanto si deve sempre considerare che più la superficie si avvicina all'orizzontale, più la rugosità superficiale aumenta per via dell'effetto scala, richiedendo quindi una fase di post-process considerevole.

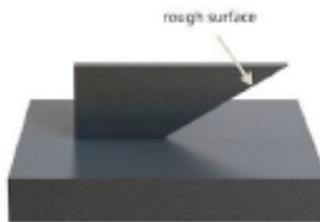


Figura 54: Superficie inclinata [6]

La polvere del letto, inoltre, non provvede al sostentamento alla parte sporgente man mano che viene creata, quindi oltre un certo angolo, che dipende dalla tipologia di materiale, sono necessari i supporti. Se non utilizzassimo strutture di supporto che ancorano la superficie inclinata, a causa del rapido raffreddamento questa si deformerebbe, creando anche problemi durante il passaggio della racla. L'angolo minimo al di sotto del quale sono necessari i supporti vale:

- 30° per l'acciaio e la lega di cobalto-cromo;
- 45° per le leghe di alluminio;
- 20° - 30° per la lega di titanio.

I supporti seppur indispensabili costituiscono sempre un materiale di scarto, per cui durante la fase di progettazione si deve, ove possibile, cercare di minimizzarli. Esistono anche delle strutture auto-supportanti, come mostrato in Figura 55, per le quali non è necessario l'impiego di supporti, quindi si potrebbero impiegare nel caso di fori o canali.



Figura 55: Strutture auto-supportanti [6]

Per quanto riguarda i fori è importante distinguere in funzione del loro diametro, al di sotto dei 6mm non si ha bisogno di strutture di supporto ed i difetti sono poco visibili, per diametri maggiori i 6 mm i difetti sono più evidenti e se possibile conviene pensare di modificare la forma del foro, scegliendone una auto-sopportante, infatti non è molto agevole poi rimuovere i supporti. È bene precisare che stiamo parlando di fori e non di canali, non sarebbe possibile realizzare un canale di forma complessa di diametro di appena 6 mm, in quanto sarebbe troppo complicata la rimozione della polvere.

È bene tenere presente che una volta che i supporti sono stati rimossi, lasciano delle tracce sul componente, quindi si deve fare in modo di mettere i supporti principalmente lungo le superfici di cui comunque si deve effettuare una lavorazione successiva, oppure in parti nascoste del componente che necessariamente poi verranno lavorate.

Consideriamo il caso del componente mostrato in Figura 56, che presenta una superficie orizzontale che necessita di supporto. [6]



Figura 56: Come prevedere i supporti per questo componente

Si può pensare di riempire totalmente la finestra di supporti, rimuovendoli in seguito per elettroerosione a filo, ma in questo modo si lascerebbe una traccia su due superfici, un'alternativa potrebbe essere quella di utilizzare supporti offsestati, che vengono leggermente traslati rispetto al pezzo, crescono a partire dalla piattaforma e poi si inclinano fino a collegarsi alla superficie da sorreggere, come mostrato in Figura 57. [6]



Figura 57: Esempio di supporti offsestati

I supporti offsettati, oltre a garantire minori lavorazioni di finitura superficiale, aiutano lo smaltimento di calore, evitando ulteriori stress termici al componente.

Altre soluzioni possono essere:

- Ruotare il componente in modo che sia principalmente auto supportato, di contro si aumenta così l'altezza del job e potenzialmente il tempo di stampa;
- Modificare il design, anziché una superficie orizzontale si potrebbero usare una serie di archi o angolature, di modo da minimizzare i supporti;
- Sostituire quella finestra centrale con una serie di asole che non richiedono supporti, quindi con parti circolari di diametro inferiore ai 6 mm.

Le soluzioni che si potrebbero adottare sono rappresentate in Figura 58 [6]:

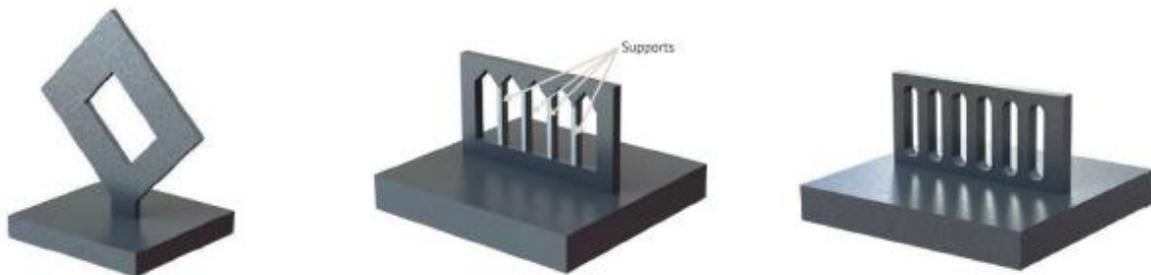


Figura 58: Altre soluzioni per minimizzare i supporti

Altri accorgimenti per i supporti di superfici aggettanti sono mostrate in Figura 59, la prima immagine, in alto a sinistra, propone il maggior quantitativo di supporti, perché si ha una struttura massiva che arriva fino alla piattaforma; il caso raffigurato in alto a destra invece considera dei supporti angolati, che però lasciano tracce su due superfici del componente; l'ultimo caso non prevede l'impiego di supporti, ma prevede una modifica del design.

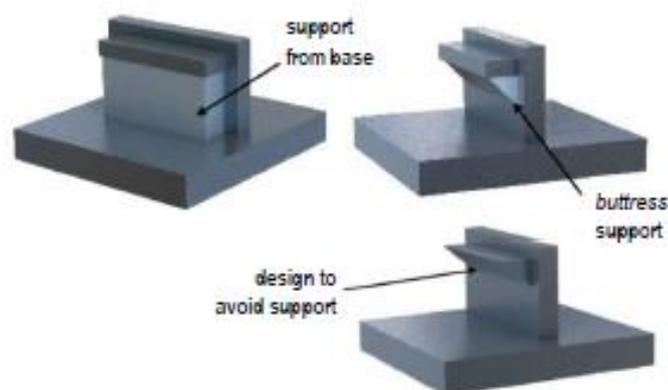


Figura 59: Altri accorgimenti per i supporti [6]

In generale si cerca di limitare il più possibile il volume di supporti, la situazione ideale sarebbe quella di eliminarli totalmente, ma per le geometrie più complesse è impossibile e spesso non si può modificare il progetto di partenza impiegando forme auto-supportanti. Il miglior compromesso è quello di ridurli il più possibile, in modo da risparmiare tempo, energie e denaro.

L'orientamento del componente all'interno del volume di lavoro non deve garantire solo il minor numero di supporti, ma anche una non interferenza col passaggio della racla e una sezione fusa troppo grande per evitare ulteriori stress termici, un esempio è mostrato in Figura 60. [2]

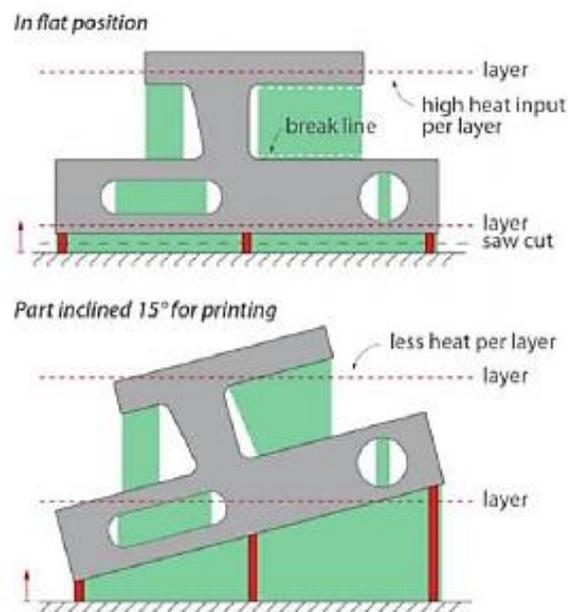


Figura 60: Esempio di posizionamento di un componente all'interno del volume di lavoro

La configurazione in alto, orizzontale rispetto la piattaforma di costruzione, comporta che se il pezzo è molto massivo si ha una grande quantità di polvere che viene fusa e solidificata, quindi per layer si ha una maggior quota di calore, con conseguenti stress termici. Il tutto peggiora nel caso in cui si stia lavorando la lega di titanio, che si tensiona facilmente, si potrebbe verificare il distacco del componente dalla piattaforma e tensioni residue così elevate che il solo trattamento termico di distensione potrebbe non essere sufficiente. Già un'inclinazione di 15° porta a benefici perché riduce il calore che si genera per strato, tuttavia questa operazione non sempre è fattibile, dipende dal volume di lavoro che si ha a disposizione e dalla grandezza del componente.

Per quanto riguarda le strutture snelle, si tiene conto di un rapporto tra altezza e sezione che si mantiene di 8:1. Man mano che avanza la costruzione le sezioni che si trovano più in alto subiscono una forza maggiore applicata dalla lama, che passa più volte, quindi si possono generare delle deformazioni con possibile interruzione del processo.



Figura 61: Strutture snelle [6]

La soluzione a questo problema è raffigurata in Figura 61 all'estrema destra, infatti è possibile irrigidire la struttura collegando le due sezioni verticali ad una certa altezza, preferibilmente con strutture auto-sopportanti come in questo caso che si adotta un arco.

Altri accorgimenti possono essere di posizionare il componente evitando che presenti spigoli vivi o sezioni molto grandi nell'incontro con la racla, quest'ultima si potrebbe danneggiare o potrebbe indurre grandi sollecitazioni sul componente. Ad esempio in Figura 62, si osserva come una sezione sottile offra il suo lato lungo al recoater, in questo caso la lama provocherà sollecitazioni troppo grandi sul componente, che non avendo una sezione grande per resistere, si deformerà.



Figura 62: Sezione sottile parallela al recoater [6]

Una possibile soluzione è quella di inclinare leggermente il componente, di modo che l'impatto con la lama sia graduale, come in



Figura 63: Soluzione ad una sottile sezione parallela al recoater [6]

In conclusione le regole per il design per le tecnologie Laser Powder Bed Fusion si basano sull'efficienza del processo di costruzione del componente.

La progettazione deve necessariamente considerare che si tratta di una produzione layer by layer, quindi si deve prestare particolarmente attenzione a quelle fasi in cui la sezione che si sta costruendo è particolarmente debole. Da ciò deriva il giusto compromesso per la scelta dell'orientamento del componente all'interno del volume di lavoro, che consideri: la minimizzazione dei supporti, il volume di lavoro disponibile per quella macchina e le dimensioni del componente, il possibile impatto che la racla può avere con la sezione ed i possibili stress termici in caso di componenti massivi.

1.4 Post- processing

Focalizzandoci sulle tecnologie a letto di polvere, in particolar modo sulla Selective Laser Melting, abbiamo accennato al fatto che i componenti prodotti risultano particolarmente tensionati a causa dell'elevata velocità di raffreddamento. Per questo motivo a seguito della produzione in additive manufacturing è necessario effettuare dei trattamenti termici.

I trattamenti si possono eseguire sono:

- Distensione;
- Ricottura;
- Solubilizzazione;
- Invecchiamento.

La distensione si è soliti farla a seguito dei processi laser e serve a ridurre le tensioni residue presenti nel componente, per la lega di alluminio AlSi10Mg solitamente si esegue una distensione di 2h a 300 °C, mentre per la lega di Ti6Al4V si impiegano 2 h ad 800 °C, il raffreddamento viene poi effettuato in forno o in aria. [5]

La ricottura è un trattamento termico che serve a favorire la crescita dei grani qualora siano richieste ad esempio proprietà di resistenza alle alte temperature o al creep. La struttura a grani molto fini, conseguenza di una produzione per SLM, conferisce proprietà di resistenza a trazione, ma di contro si genera una riduzione di duttilità.

La solubilizzazione invece serve a portare in soluzione i precipitati e ad omogeneizzare la struttura, solitamente si verifica una diminuzione delle caratteristiche meccaniche, infatti questo trattamento serve a preparare la struttura ai successivi trattamenti di invecchiamento, che permettono di recuperare le prestazioni meccaniche, grazie alla precipitazione di fasi indurenti.

Quando i precipitati sono piccoli e ben dispersi all'interno del materiale il movimento delle dislocazioni è impedito, quindi si riesce ad ottenere valori alti di resistenza meccanica. Relativamente all'additive manufacturing si fonde uno strato molto sottile e si ha una velocità di solidificazione molto elevata, tale per cui si formano precipitati nanometrici, quindi per alcune leghe il processo di additive permette di evitare trattamenti di invecchiamento molto spinti. [5]

L'additive manufacturing può essere considerato un processo produttivo che porta alla formazione di un grezzo, un "near net shape", quindi poi saranno necessari altri trattamenti successivi per giungere al pezzo finito.

È importante controllare la finitura superficiale in funzione delle esigenze di progetto, poiché spesso le rugosità che si ottengono a seguito di processi di additive manufacturing non sono accettabili. In Tabella 1 ad esempio sono riportate le principali caratteristiche per i processi SLM e DED, si nota in particolare la qualità superficiale ottenibile con le due tecnologie.

| Characteristic | Power Bed Fusion | Directed Energy Deposition |
|-------------------|--|---|
| Build speed | 5÷20 cm ³ /h (~ 40÷160 g/h) | Up to 500 g/h (~ 70 cm ³ /h) |
| Accuracy | ± 0.02÷0.05 mm / 25 mm | ± 0.1÷0.5 mm / 25 mm |
| Detail capability | 0.04÷0.2 mm | 0.5÷1.0 mm |
| Surface quality | Ra 4÷10 μm | Ra 7÷20 μm |

Tabella 3: Confronto caratteristiche SLM e DED

In molti casi per finire il componente è sufficiente una pallinatura con sferette di materiale ceramico o leggermente abrasivo, che impattano sulla superficie generando uno stato di compressione superficiale che migliora il comportamento a fatica, infine se richiesto si effettua una lucidatura successiva. In base alle operazioni di finitura bisognerà prevedere il corretto sovrametallo, solitamente si ha un sovrametallo che è il doppio della tolleranza, per l'additive manufacturing si tende ad aumentarlo leggermente.

La finitura superficiale infatti dipende dalla funzionalità finale del componente e può servire per migliorare:

- L'accuratezza dimensionale;
- L'estetica;
- La rugosità superficiale;
- La vita a fatica;
- Le proprietà tribologiche;
- La funzionalità delle parti, ad esempio per superfici di accoppiamento.

Durante la fase di progettazione bisogna anche pensare al post processing che necessiterà il pezzo, come sarà rimosso dalla piattaforma, come dovranno essere tolti i supporti, quali altre tecnologie sottrattive si dovranno eseguire, come si deve afferrare il componente per la lavorazione e se tutte le zone che devono essere rilavorate potranno essere raggiunte dall'utensile.

Quando si devono produrre componenti in metallo, l'additive manufacturing non è così semplice, a parte la fase di stampa totalmente a carico della macchina, saranno necessari altri step successivi, in quanto la maggior parte dei componenti avrà bisogno di lavorazioni di finitura per il loro impiego.

L'AM è la fase di un ciclo di produzione, un passaggio all'interno di una sequenza che ne comprende anche molti altri, quindi la fabbricazione additiva richiede uno studio di pianificazione e coordinamento.

Capitolo 2 Applicazioni dell'Additive Manufacturing nel settore aerospaziale

2.1 Introduzione

Da sempre il settore aerospaziale è stato promotore di nuove idee e tecnologie sostenendo l'innovazione e la ricerca.

La progettazione di ogni componente aerospaziale è sempre piuttosto problematica poiché deve garantire ottime performance ma anche fattori di sicurezza importanti, dovuti alle difficili condizioni di lavoro, quali notevoli sollecitazioni durante il lancio, ripetuti e considerevoli cicli termici e l'assenza di gravità. Parallelamente anche i fattori costo e peso giocano un ruolo cruciale, infatti si stima che per mandare un kg in orbita si ha approssimativamente un costo di 40k€, più in generale la riduzione di peso è auspicabile per qualunque prodotto aerospaziale, ma anche aeronautico.

In ambito aerospaziale tendenzialmente si hanno piccole o medie produzioni, quindi il costo del singolo componente deve tener conto anche delle eventuali attrezzature o utensili necessari.

Si devono dunque progettare e produrre pochi elementi ottimizzati nel rapporto resistenza/peso ed allo stesso tempo dal costo contenuto. Tutti questi aspetti non possono che indirizzare all'Additive Manufacturing, che consente di mettere i propri vantaggi al servizio del settore aerospaziale, in particolar modo la fabbricazione additiva per materiali metallici, che sfrutta l'ottimizzazione topologica e la libertà di design, ha un impatto marcatamente positivo sui componenti aerospaziali.

L'additive Manufacturing risulta un'efficace alternativa alle tecnologie tradizionali, così come dimostra l'interesse e gli investimenti delle agenzie NASA, ESA, ASI e dei più grandi nomi dell'industria aerospaziale come Thales Alenia Space (TAS), Airbus, Lockheed Martin, Space X ecc...

L'additive manufacturing per i materiali metallici è vista dall'European Space Agency come una tecnologia cardine per la produzione delle nuove generazioni di astronavi e lanciatori, essendo di fatti adatta per le applicazioni aerospaziali.

I principali benefici dell'AM per il settore aerospaziale sono l'estrema personalizzazione e libertà di progettazione senza costi aggiuntivi, l'importante riduzione del peso e del materiale utilizzato, grazie all'ottimizzazione topologica. Infatti una massa contenuta è fondamentale al fine di ridurre le sollecitazioni, già piuttosto gravose, cui i componenti aerospaziali sono soggetti durante il lancio.

L'additive manufacturing permette inoltre di mantenere basso il buy-to-fly ratio, ossia il rapporto tra il materiale acquistato e quello del componente finale, con conseguente riduzione degli scarti dovuti alla produzione.

Le potenzialità dell'AM nel settore aerospaziale sono sicuramente grandi, tuttavia ci sono alcuni aspetti da migliorare per incrementare la fiducia in questa nuova tecnologia, poiché le certificazioni cui è sottoposto questo settore sono molto complesse. Alcuni fattori critici sono ad esempio la difficoltà nel monitorare il processo layer by layer per identificare subito eventuali difetti e riuscire ad interrompere il job, evitando uno spreco di tempo e materiale; oppure una scarsa standardizzazione, ad esempio le sorgenti laser montate sulle varie macchine non potranno mai essere esattamente identiche, così come la qualità delle polveri di partenza o il set di parametri che sono più adatti per quello specifico materiale processato.

2.2 Attuali applicazioni dell'AM in ambito aerospaziale

L'additive Manufacturing presenta un campo di applicabilità in un ampio range di materiali: leghe di alluminio, leghe di titanio, superleghe, polimeri e tecnopolimeri; anche le dimensioni possono variare da componenti molto piccoli a più grandi, compatibilmente con i volumi di lavoro delle stampanti 3D attualmente in commercio.

Le applicazioni più diffuse della fabbricazione additiva in ambito aerospaziale riguardano:

1. Strutture di supporto;
2. Elementi per la propulsione;
3. Inserti;
4. Guide d'onda;
5. Elementi di supporto alla vita dell'equipaggio;
6. Pannelli termo strutturali.

Le tecnologie maggiormente impiegate riguardano quelle a letto di polvere, sia laser SLM che a fascio di elettroni EBM, ma anche la tecnica della deposizione diretta.

Il primo componente avente una funzione strutturale ed abbastanza critica, realizzato in Electron Beam Melting, che è stato lanciato su un satellite per le telecomunicazioni risale al 2011 da Airbus. La parte prodotta in lega di titanio consentiva di risparmiare il 30% del peso, rispetto il componente costruito con le tecnologie tradizionali, ma di mantenere le medesime funzioni.

Molti componenti sono stati ottimizzati topologicamente al fine di ottenere riduzioni di massa importanti e si tratta principalmente di staffe ed elementi di supporto. Grazie alle fasi di Re-design la geometria è stata totalmente stravolta, rispettando però i vincoli progettuali, ed ottenendo le tipiche strutture alleggerite, come quelle in Figura 64.



Figura 64: Componenti alleggeriti con ottimizzazione topologica

Thales Alenia Space France è particolarmente avanti nell'uso dell'additive manufacturing per realizzare componenti di supporto, che attualmente sono impiegate in differenti satelliti in orbita, si contano più di 400 elementi in lega di titanio e alluminio. Nei siti francesi si è impiegata la riprogettazione per ottenere da elementi monolitici strutture alleggerite con importanti riduzioni di peso; oppure da design che prevedevano l'impiego di diversi componenti alla stampa di un unico, riducendo in questo caso le fasi di assemblaggio.

In Thales Alenia Space Italia invece si è impiegata la tecnologia di deposizione diretta, partendo quindi da un filo di materiale metallico, per costruire un grande serbatoio per l'acqua necessaria all'equipaggio durante le missioni spaziali. In questo caso non sono state utilizzate le tecniche a letto di polvere per via delle dimensioni del serbatoio, non compatibili con i volumi di lavoro delle macchine, ma anche perché la deposizione diretta consente una velocità

di costruzione decisamente più elevata, anche se di contro si ottiene un'accuratezza inferiore, caratteristica indispensabile però per l'applicazione specifica. Il vantaggio della fabbricazione additiva si è tradotto in una riduzione del buy-to-fly ratio, con un risparmio in termini di costo non indifferenti ed una riduzione del time-to-market.

Il processo di deposizione Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM) è stato impiegato invece per la costruzione della cupola di un serbatoio per il carburante per il satellite LM2100, avente diametro di 1,16m. Il serbatoio è composto da due cupole realizzate in EBAM e da una parte cilindrica per la quale si utilizzano le tecniche tradizionali, i tre elementi vengono poi saldati insieme, con un risparmio importante. In Figura 65 si può osservare la cupola in fase di costruzione.



Figura 65: Processo EBAM per la costruzione della cupola di un serbatoio [7]

Sono inoltre numerose le applicazioni dell'additivi manufacturing per aerospazio nell'ambito della propulsione:

1. Camere di combustione;
2. Teste di iniezione;
3. Ugelli;
4. Corpi di valvole;
5. Serbatoi;
6. Tubi di geometrie complesse.

Relativamente alla realizzazione degli elementi costituenti i razzi, mediante il manufacturing tradizionale, la necessità di diversi cicli di prototipazione e step produttivi rende il processo lungo e costoso. Ad esempio per la costruzione della camera di combustione si può impiegare

dai 10 ai 14 mesi, in quanto si devono creare separatamente tutti i componenti che la costituiscono, inoltre devono essere realizzati i canali di raffreddamento intorno alla camera attraverso lavorazioni per asportazione di truciolo. Tendenzialmente è molto costoso e complicato produrre questi canali di raffreddamento, cono necessari utensili particolari per le macchine CNC, inoltre vengono solitamente creati dei segmenti di canali poi saldati tra loro. L'additive manufacturing consente la produzione di tutta la camera di combustione in un unico step, riducendo le lavorazioni necessarie e permette la progettazione dei canali di raffreddamento in geometrie irrealizzabili con le tecnologie tradizionali. [8]

La testa di iniezione è uno degli elementi centrali del sistema di propulsione, ha il compito di iniettare il carburante all'interno della camera di combustione. Solitamente sono composti da numerosi elementi che devono essere lavorati e saldati insieme, con una fase di assemblaggio molto lunga. La produzione in AM consente di produrre un elemento così complesso nella stessa fase produttiva, la parte più critica costituita dagli'iniettori potrebbe richiedere al più una fase di post-process per riprendere i fori.



Figura 66: Testa di iniezione. Credit EOS

In Selective Laser Melting è stata realizzata la testa di iniezione per il lanciatore Ariane 6, effettuando però un re-design che ha semplificato la struttura inizialmente composta da più di 200 elementi, ottenendo il 50% di riduzione di costo ed un lead time tre volte inferiore. [8]

Space-X nel 2014 per la prima volta ha lanciato il razzo Falcon 9 con il corpo della valvola MOV (Main Oxidizer Valve), in uno dei 9 motori Merlin, stampato in 3D. La valvola è situata in un ambiente ad alta pressione, bassa temperatura e con elevate vibrazioni. La stampa del corpo della valvola richiede pochi giorni a fronte di mesi.

Space X è stata anche la prima compagnia a lanciare il primo endoreattore totalmente stampato in 3D, il SuperDraco del veicolo spaziale Dragon 2, mostrato in Figura 67. In particolare la camera di combustione è realizzata in Inconel, una superlega a base di Nichel dalle ottime performance, mediante il processo SLM. [9]



Figura 67: Endoreattore SuperDraco totalmente stampato in 3D. Credit Space X

Rocket Lab, società aerospaziale che ha sede in California, produce in Electron Beam Melting sin dal 2013 il motore Rutherford nella quasi totalità dei suoi componenti: camera di combustione, iniettori, valvole, pompe. Il motore, mostrato in Figura 68, è montato sul lanciatore Electron che viene impiegato per piccoli satelliti. Nel 2019 la società ha provato l'affidabilità dei motori ottenuti in stampa 3D mandando in orbita con successo quattro satelliti grazie al lanciatore Electron. [8]



Figura 68: Motore Rutherford della società Rocket Lab. Credit: Rocket Lab

Relativity Space è un'altra azienda aerospaziale, che dal 2019 ha preso in affitto dalla NASA lo stabilimento dello Stennis Space Center, ed ha come obiettivo semplificare il processo di

progettazione e assemblaggio dei razzi usando quanto più possibile la fabbricazione additiva. Il loro primo razzo, Terran 1, è composto da poche parti rispetto i razzi convenzionali e si stima di riuscire a produrlo completamente in pochi mesi.

Relativity dispone di una delle più grandi stampanti 3D al mondo, essa presenta tre bracci robot, come si può osservare in Figura 69, e sfrutta il processo DED con la possibilità di produrre componenti di diametro fino a 2,7 m ed altezza di circa 4,5 m.



Figura 69: Stargate la stampante 3D più grande al mondo. Credit: Relativity Space

Questa società attualmente è l'unica che applica la fabbricazione additiva per la realizzazione di un razzo completo, in quanto questa tecnologia permette di cambiare velocemente il design e usare minor quantità di attrezzature, rispetto a quelle richieste per la produzione di un razzo con le lavorazioni tradizionali. [10]

Sicuramente l'additive manufacturing aiuta a ridurre i costi di produzione dei motori, che rappresentano di solito gli elementi maggiormente dispendiosi dal punto di vista economico, rispetto a tutti gli altri componenti dei razzi.

Parallelamente alle applicazioni che coinvolgono i materiali metallici, TAS-I, per conto dell'ESA, ha realizzato mediante la Fused Deposition Modeling una cassetta porta utensili in ULTEM, un tecnopolimero dalle alte prestazioni. La cassetta è attualmente in uso nel modulo Columbus dell'ISS ed è stata installata per la prima volta da Luca Parmitano nel 2013.

L'esplorazione dello spazio negli'ultimi anni si sta intensificando e numerose nuove missioni sono state programmate nel futuro. La presenza dell'uomo nello spazio per lunghi periodi di tempo ed in luoghi sempre più lontani dal pianeta Terra, hanno consentito lo sviluppo del concetto del "In-Orbit Assembly and Manufacturing", al fine di evitare continui approvvigionamenti dal nostro pianeta e produrre componenti molto grandi che sarebbero difficili da mandare in orbita con gli attuali lanciatori.

Un altro aspetto che sta prendendo piede invece riguarda la "Out-of-Earth Manufacturing", che si riferisce principalmente all'Additive Manufacturing, ossia la possibilità di poter realizzare direttamente nello spazio i componenti che servono. Si potrebbe incorrere ad alcuni limiti relativi ad esempio all'uso dei processi a letto di polvere, dovuti all'assenza di gravità, oppure relativamente ai volumi di lavoro delle stampanti.

La prima stampante 3D europea che ha operato nello spazio risale al 2015, mediante un progetto sostenuto dall'ASI, Agenzia Spaziale Italiana, in collaborazione tra l'altro con Thales Alenia Space Italia. La macchina, chiamata POP 3D (Portable on Orbit 3D Printer), si basava sul processo FDM ed il materiale impiegato era il PLA. Lo scopo dell'esperimento era quello di validare la tecnologia additiva in condizioni di microgravità e di confrontarla con il medesimo processo effettuato sulla Terra.

Capitolo 3 Confronto tra AM e tecnologie tradizionali

3.1 Introduzione

La fabbricazione additiva in molti casi può essere un'alternativa economicamente conveniente rispetto ai processi produttivi tradizionali. In particolare modo il Design For Additive Manufacturing, integrato con l'ottimizzazione topologica, consente di sfruttare pienamente il potenziale ed i vantaggi delle tecnologie additive.

L'additive manufacturing è un processo produttivo complementare alle altre tecnologie convenzionali. In particolare facendo un confronto con le altre tecniche di metallurgia delle polveri, si può osservare in Figura 70 dove si colloca l'Additive Manufacturing in funzione del numero dei componenti prodotti e delle loro dimensioni.

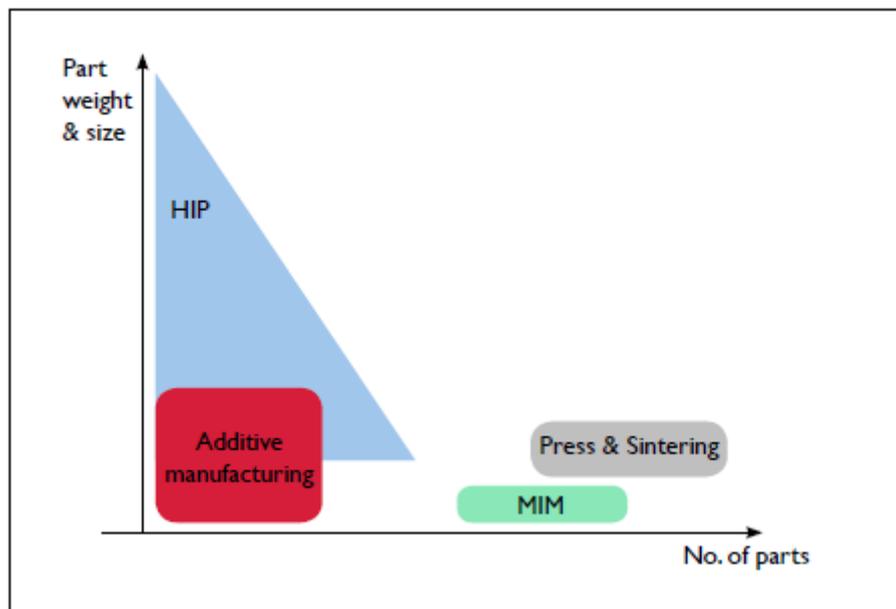


Figura 70: Confronto tra diverse tecnologie produttive tradizionali e l'Additive Manufacturing [3]

La fabbricazione additiva è la più adatta in caso di produzione di piccoli lotti e di componenti di dimensioni ridotte, si sovrappone in parte alla tecnica HIP (Hot Isostatic Pressure) perché va bene per produrre pochi esemplari. Tuttavia la HIP è generalmente usata per realizzare parti massive, anche molto grandi che arrivano a pesare fino a centinaia di chilogrammi, mentre la fabbricazione additiva si utilizza di più per costruire componenti metallici decisamente più piccoli, però dalle forme complesse che presentano grande libertà di design.

Le altre due tecniche presenti nel grafico sono MIM (Metal Injection Moulding) e Press & Sintering, anch'esse offrono la possibilità di produrre parti "near net shape", cioè di forma quasi finita, ma sono raccomandate per piccoli componenti prodotti in serie. [3]

Dal punto di vista economico si è visto anche che il punto di pareggio dell'AM rispetto alle tecnologie tradizionali si verifica in corrispondenza di piccoli lotti produttivi, dove una tecnica convenzionale presenta un costo maggior in quanto non si riesce a diluire la spesa delle attrezzature su pochi componenti, si parla in tal caso di "Individualization for free". Allo stesso modo un manufacturing tradizionale ha un incremento di costo quasi esponenziale in funzione della complessità geometrica del componente prodotto, mentre il costo della fabbricazione additiva prescinde da questo parametro e dipende solo dalle dimensioni del componente, si è parlato della cosiddetta "Complexity for free".

Anche le proprietà meccaniche ottenibili con i processi di additive manufacturing, in special modo per le tecniche a letto di polvere per materiali metallici, sono peculiari di queste tecnologie. Se il processo è ben controllato si arriva ad ottenere una struttura densa con porosità praticamente nulle, inoltre grazie alla rapida solidificazione si genera una microstruttura a grani fini che comporta ottime caratteristiche di resistenza meccanica. Solitamente le proprietà meccaniche dei prodotti della fabbricazione additiva sono superiori delle proprietà ottenute con processi di colata e paragonabili a quelli della microfusione.

Nella Figura 71 è possibile osservare un grafico che riporta la resistenza a rottura e l'allungamento percentuale per la lega di titanio Ti6-4, nel caso di lavorazioni con processi tradizionali e con tecnologie additive, evidenziando anche la corrispondente microstruttura che si genera. [5]

Creandosi un diverso grano cristallino, conseguentemente le proprietà meccaniche saranno differenti. Una microstruttura fine impedisce la deformazione, che deriva inizialmente dal movimento delle dislocazioni, quest'ultime, per la presenza di innumerevoli bordi di grano, tenderanno ad accumularsi proprio in corrispondenza dei bordi non consentendo la deformazione. Al contrario una struttura a grani più grandi consente una maggiore deformazione, ma allo stesso tempo si verificherà una minore resistenza allo snervamento.

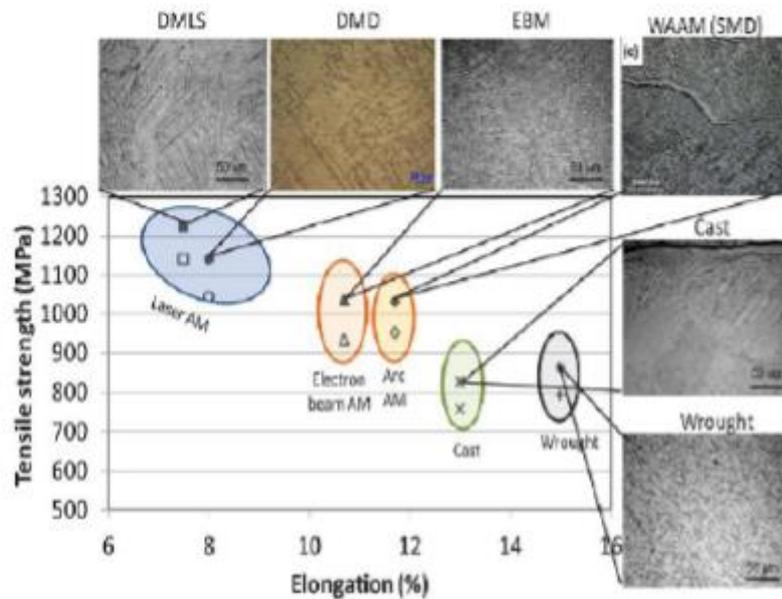


Figura 71: Tensione di snervamento Vs allungamento a rottura per una lega Ti6Al4V processata con differenti tecnologie [5]

Relativamente ai parametri della lega di titanio indagata in Figura 71, si può notare una variabilità dell'UTS (Ultimate Tensile Strength) dai 700 MPa per la lega ottenuta per casting ai 1200 – 1300 MPa per il medesimo materiale prodotto con le tecnologie Laser. Parallelamente le tecniche Laser dell'additive manufacturing sono quelle che presentano il peggior allungamento a rottura, infatti quasi mai si può adoperare un componente con così bassi valori di allungamento, anche perché con una microstruttura a grani così fini non si raggiungeranno mai valori accettabili di resilienza e tenacità a frattura. Nel caso delle tecnologie tradizionali le deformazioni plastiche intervengono molto presto, generando un allungamento significativo, l'area sottesa la curva del diagramma tensione deformazione, che identifica la resilienza sarà nettamente maggiore, rispetto a materiali ottenuti mediante processi additive, in cui si ha una deformazione prevalentemente elastica con rette passanti per l'origine nel medesimo diagramma $\sigma - \epsilon$.

È importante ricordare però che con un semplice trattamento termico è facile permettere l'ingrandimento del grano a piacere al fine di ottenere valori di allungamento accettabili, mentre è più complicato trasformare un grano grande in una struttura più fine. Con idonei trattamenti termici si permette l'accrescimento dei grani in modo omogeneo, ottenendo in definitiva migliori caratteristiche rispetto materiali prodotti con le tecnologie tradizionali, come ad esempio il casting che porta alla formazione di grani colonnari esternamente e grani equiassici internamente, con diverse risposte alle sollecitazioni cui sono sottoposti.

È da notare che la tecnologia Electron Beam Melting restituisce caratteristiche di tipo intermedio, perché si basa su un processo di tipo caldo, poiché la potenza del fascio elettronico è maggiore rispetto ad una sorgente laser. Ciò produce un ingrandimento dei grani già durante la fase di stampa, infatti spesso a seguito di questa tecnologia si possono evitare ulteriori trattamenti termici.

Sempre relativamente alla lega Ti6Al4V, la seguente Figura 72 effettua un confronto nel caso di lavorazioni per additive manufacturing, in particolar modo l'SLM in blu, e le tecniche di colata e HIP, in azzurro formatura in verde. [2]

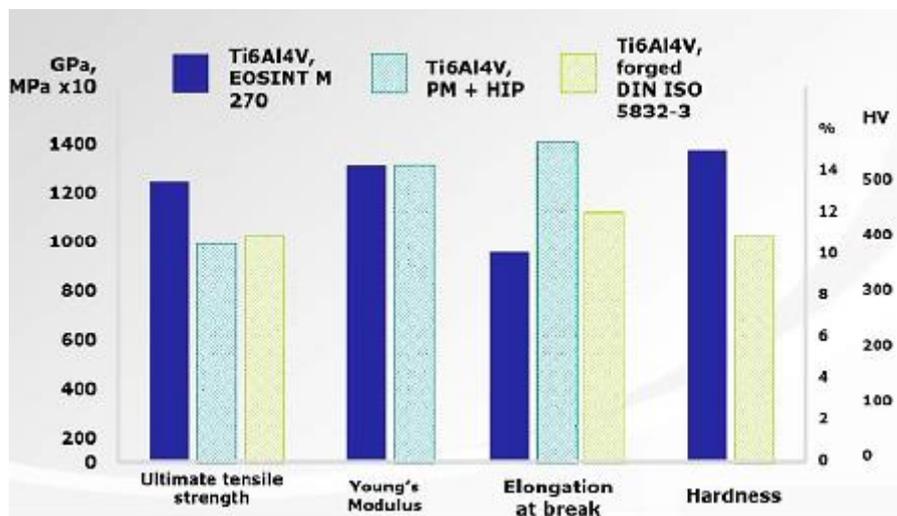


Figura 72: Confronto delle caratteristiche meccaniche per AM e tecnologie tradizionali

Come ci si aspetta la Selective Laser Melting consente di ottenere carico a rottura e durezza superiori rispetto le altre due tecniche, un modulo elastico paragonabile alla colata + HIP, mentre solo per l'allungamento a rottura presenta valori inferiori.

Per quanto riguarda invece la rugosità superficiale ottenibile con il processo di Selective Laser Melting si è invece intorno a valori di 25 – 40 μm, sono sicuramente valori alti se paragonati alle lavorazioni alle macchine utensili, che consentono di ottenere rugosità superficiali inarrivabili con le tecnologie additive. Per questa ragione è necessario, a seguito dei processi additivi, riprendere le superficie di accoppiamento con le lavorazioni tradizionali.

Nella tabella in Figura 73 è presentato un confronto riguardante la rugosità superficiale ottenibile con SLM e le lavorazioni alle macchine utensili. Il processo di lucidatura è quello che consente di spingersi a rugosità dell'ordine di 0,4 – 0,7 μm, infatti tale processo è accoppiato

al SLM quando sono richieste tolleranze più spinte, così come la pallinatura, che associata al SLM permette di migliorare la rugosità superficiale raggiungendo i 16 μm . [3]

| Achievable roughness average Rz in μm | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|--|
| | 0,04 | 0,06 | 0,10 | 0,16 | 0,25 | 0,40 | 0,63 | 1,0 | 1,6 | 2,5 | 4,0 | 6,3 | 10 | 16 | 25 | 40 | 63 | 100 | 160 | 250 | |
| Turning | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Milling | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Polishing | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| SLM - as built | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| SLM - after shot - peening | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| SLM - after polishing | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

| |
|---------------------|
| Average Range |
| Less Frequent Range |

Figura 73: Rugosità superficiali ottenibili con diverse lavorazioni

Dal punto di vista della progettazione il confronto tra le tecnologie additive e tradizionali evidenzia un approccio totalmente diverso, come si evidenzia in Figura 74.

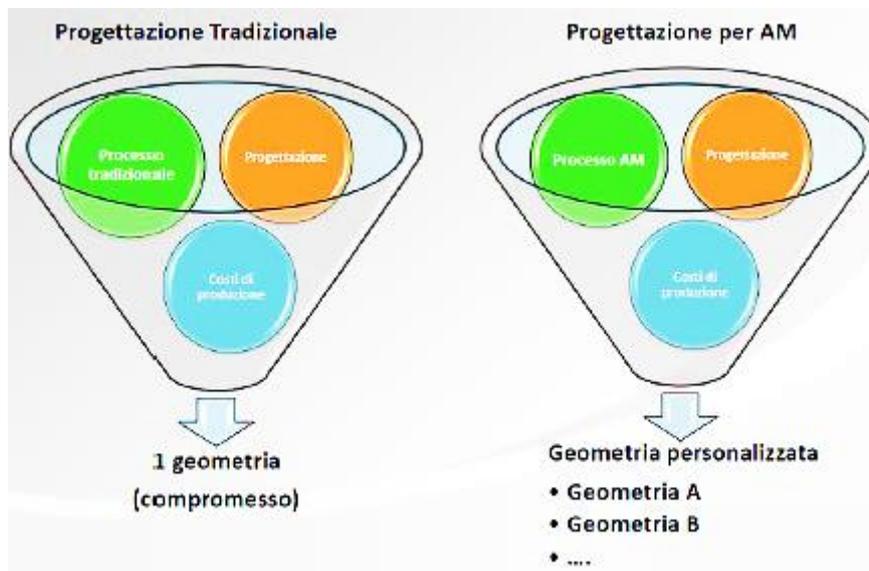


Figura 74: Progettazione tradizionale Vs progettazione per AM

La produzione con tecniche convenzionali richiede l'impiego di utensili o attrezzature, come ad esempio gli stampi, che limitano la geometria ottenibile ad una sola, si potrebbero ottenere delle varianti solo attraverso altre attrezzature.

L'additive manufacturing, grazie alla totale assenza di utensili permette di ottenere molte varianti, totalmente personalizzabili senza dover scendere a compromessi, inoltre consente di

ridurre i tempi ed i costi di sviluppo prodotto, dato che non occorrono investimenti per produrre le attrezzature ausiliarie. Anche se il vantaggio più grande consiste nella libertà di design che ha il progettista e nella possibilità di riprogettazione per massimizzare le prestazioni di un componente, minimizzandone in peso, grazie all'ottimizzazione topologica.

3.2 Tecniche ibride

Negli ultimi anni hanno trovato sempre maggiore diffusione le tecnologie ibride, nate come connubio tra l'additive manufacturing e le lavorazioni per asportazione di truciolo. In particolar modo la tecnica di fabbricazione additiva che maggiormente si presta è la Laser Deposition.

È la tecnica, tra quelle che impiegano polvere, che presenta la maggiore produttività, si arriva a deporre anche mezzo chilogrammo di polvere l'ora, però consente di realizzare geometrie più semplici. Si preferisce la tecnologia additiva nel caso di metalli costosi perché se lavorati da pieno si avrebbe una grande quantità di scarti.

L'azienda apripista di questa tecnologia permette di comprare da loro solo la testa di sinterizzazione, oppure il sistema ibrido che nella stessa macchina può avere una testa che deposita il materiale ed una che fresa. Tenzialmente si deposita con un certo sovrametallo e poi la macchina presenta un software che calcola il percorso dell'utensile per la fase successiva di fresatura. È un sistema a 5 assi, che differisce dalla fresa a 5 assi per la presenza della testa di deposizione, quindi la precisione del posizionamento è quella della fresatrice, ossia dell'ordine del centesimo di millimetro.

Con un sistema ibrido si può creare il semilavorato o la "near net shape", costruendo in modo additivo, poi interviene la fresa per la fase finale di finitura, in questo modo si ha il grande vantaggio di un unico posizionamento, ma allo stesso tempo si limita la produttività delle due macchine al 50%, rispetto all'avere le due macchine separate. La flessibilità nel passaggio tra la testa di deposizione laser e la fresa consente anche la finitura di superfici che non sono più raggiungibili una volta terminata la costruzione.



Figura 75: Deposizione e fresatura in un sistema ibrido

In Figura 75 sono rappresentate le due fasi successive di deposizione e fresatura. [2]

Qualora siano richiesti trattamenti termici successivi, si sconsiglia l'uso di una tecnologia ibrida, infatti conviene mantenere separate le due macchine e quindi completare la fase di deposizione, effettuare il trattamento termico ed in seguito operare con le lavorazioni di fresatura o finitura.

Oltre alla realizzazione di componenti definitivi, i sistemi ibridi possono essere impiegati anche per i rivestimenti, apportando ad esempio un metallo differente rispetto a quello del componente, oppure per le riparazioni di componenti danneggiati o usurati, un caso è rappresentato delle pale di turbine aerospaziali.



Figura 76: Applicazioni dei sistemi ibridi

Nel 2015 l'azienda Hybrid Manufacturing Technology ha vinto il premio per l'innovazione in Additive Manufacturing (IAMA), grazie al progetto AMBIT, che prevede l'utilizzo di una testa di laser cladding, che può essere montata al posto di un normale porta utensile ISO su una macchina per lavorazioni sottrattive, come raffigurato in Figura 77.

Il sistema permette a qualunque macchina a controllo numerico, di utilizzare teste di lavorazioni additive nel mandrino e di scambiarle in modo del tutto automatico con le teste convenzionali.

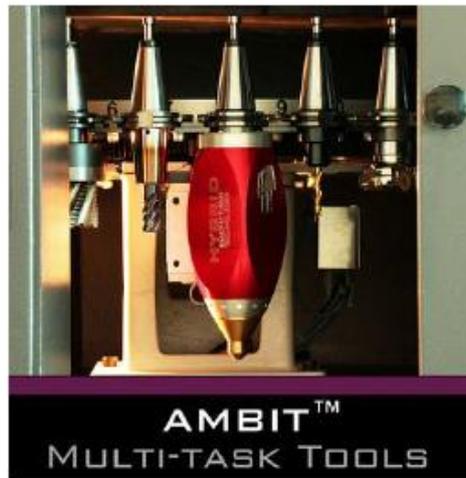


Figura 77: Testa Laser Cladding del progetto AMBIT

Parallelamente alla più gettonata fresatura si è anche sviluppata la rettificazione ibrida, che spinge ulteriormente l'integrazione additive manufacturing con tecnologie tradizionali per migliorare ulteriormente la finitura superficiale.

In conclusione la soluzione ibrida riesce dunque a combinare l'adattabilità della fabbricazione additiva alla precisione delle lavorazioni per asportazione di truciolo.

Capitolo 4: Modello di costo per AM

4.1 Introduzione

La realizzazione di un modello di costo per l'additive manufacturing, che permetta di definire a priori, tra gli altri aspetti, anche la convenienza economica di tale tecnologia, rispetto quelle sottrattive di tipo tradizionale, si è dimostrata una sfida piuttosto ardua. Non è possibile costruire un modello di validità generale, in primo luogo perché non si può prescindere dalla geometria del componente, che influenza molte altre variabili; in secondo luogo perché si deve necessariamente scegliere una tecnica di fabbricazione additiva, tra la vasta gamma di quelle disponibili, che detterà la tipologia di stampante e quindi il build time, ovvero il tempo necessario alla stampa di un componente. Il build time si è dimostrato l'elemento chiave e allo stesso tempo il più problematico da calcolare senza i software delle macchine, al fine di ottenere una stima di costo corretta.

Numerosi ricercatori hanno sviluppato differenti approcci per predire i costi di fabbricazione, i due principali metodi tipicamente impiegati sono di tipo "product-oriented" e "process-oriented". Il primo si basa sul confronto tra un nuovo componente ed altri simili che sono già stati realizzati in passato, assumendo quindi per il nuovo prodotto un costo analogo. Il secondo approccio invece, permette di realizzare un modello matematico di stima del costo considerando tutte le operazioni necessarie alla realizzazione del componente, focalizzandosi sul processo. [11]

Relativamente all'additive manufacturing molte delle ricerche sono focalizzate sulla stima del build time piuttosto che su quella del costo stesso, proprio per la stretta correlazione tra i due parametri. Sono stati proposti diversi metodi di predizione del build time, alcuni che prevedono modelli analitici basati sui parametri di processo [12-14], altri modelli matematici invece prevedono regressioni [15-16], reti neurali artificiali [17-18], l'uso della logica fuzzy o di algoritmi di machine learning [19]. Una predizione accurata del build time è fondamentale per stabilire il costo corretto di un componente.

In letteratura è possibile trovare differenti modelli di costo e relativamente a molte tecniche di fabbricazione additiva. Ruffo et al. [20] hanno proposto un approccio analitico per i processi di sinterizzazione laser, valutando il costo finale come la somma dei costi del materiale, del

lavoro e generali, similmente Atzeni e Salmi [21], che però si sono focalizzati sul processo Selective Laser Sintering per componenti metallici. Lang e Ding [22] hanno incentrato il loro studio su parti polimeriche realizzate mediante Stereolitografia, mentre Mello et al. [23] hanno calcolato il costo di componenti costruiti in Fused Deposition Modeling, considerando l'investimento iniziale, il build time, il materiale e le fasi di post-processing. Infine Yi et al. [24] hanno individuato un modello di costo per il processo SLM, proprio per supportare la decisione iniziale delle aziende di costruire mediante fabbricazione additiva. Rispetto gli altri modelli vengono considerati altri due fattori: il costo dell'elettricità ed il consumo di gas protettivo, distinguendo il caso in cui viene impiegato argon da quello in cui viene utilizzato azoto.

Nel presente lavoro di tesi si è indagato un modello di costo per tecnologie a letto di polvere, in particolar modo ci si è focalizzati sul processo Selective Laser Melting (SLM) relativamente alle due principali leghe metalliche per AM: AlSi10Mg e Ti6Al4V. L'approccio impiegato è simile a quello trattato dai professori Atzeni E. e Salmi A. nell'articolo "Economics of additive manufacturing for end-usable metal parts".

Si propone una formula analitica per stimare il tempo di stampa, inoltre suddivideremo i costi in quelli legati al processo di additive manufacturing e quelli relativi a processi ancillari, non strettamente correlati alla costruzione in fabbricazione additiva.

Il modello di costo necessiterà di una validazione, ragion per cui, al fine di confermarne l'affidabilità e l'accuratezza, verrà applicato a componenti realizzati in passato in additive manufacturing da Thales Alenia Space, dei quali sono noti i costi.

Infine il modello sarà applicato ad un caso studio specifico, facendo un confronto con le tecnologie tradizionali.

4.2 I componenti

I componenti scelti e gentilmente concessi da Thales Alenia Space per la realizzazione del modello, presentano una geometria che ben si presta alla fase di riprogettazione e ottimizzazione topologica e dimensioni piuttosto variabili, in modo da poter considerare diverse tipologie di stampanti industriali. Dimensioni e geometria dei componenti sono gli

attori principali per la scelta della macchina che andrà a stamparli, quindi per il calcolo dei rispettivi build time.

Tali componenti sono dei possibili candidati alla costruzione tramite fabbricazione additiva, su di essi si vuole testare la convenienza di questa tecnologia rispetto alla produzione con le tecniche sottrattive di tipo tradizionale.

La tipologia di componente spazia da quelli con funzione strutturale di supporto a quelli funzionali. I materiali scelti sono le due leghe più diffuse per AM: AlSi10Mg e Ti6Al4V.

Sono stati messi a disposizione anche dei pezzi che in passato sono stati realizzati in additive manufacturing per Thales Alenia Space, grazie ai quali è stata realizzata la validazione del modello di costo, in quanto erano noti sia i costi sia i tempi di produzione.

4.3 Stima del build time

Solitamente i tempi di stampa sono forniti indicativamente dai software delle stampanti, che riescono a calcolarli avendo a disposizione i parametri macchina ed il file STL del componente, che permettono di generare il percorso del laser. Non essendo in possesso di tali software, non si può che ottenere una stima del build time, dato dalla somma di due contributi legati a due variabili del componente e a due parametri della macchina. Il build time infatti è influenzato dall'altezza del job, quindi dal numero di layer che si devono costruire e dallo spessore dello strato, dalla quantità di materiale che deve essere solidificato, ma anche dai parametri di processo e dalle prestazioni della macchina, in particolar modo dal tempo che impiega la racla a stendere lo strato di polvere ed il tempo necessario alla fusione del layer.

Si è approssimato quindi il build time come:

$$BT = (t_R \cdot N) + \left(V_{tot} / v_{LAS} \right)$$

In cui si indica con:

BT [h]: build time;

t_R [h]: tempo di recoating, il tempo che impiega la racla per stendere la polvere per ogni strato, è una caratteristica della macchina, tale valore sarà stimato di volta in volta in funzione delle dimensioni della piattaforma;

N: numero di layer che costituiscono il componente;

V_{tot} [cm^3]: è il volume totale, dato dalla somma del volume del pezzo e del volume dei supporti, anche questo parametro è stato stimato mediante l'utilizzo del software "Magics" di Materialise;

v_{LAS} [cm^3/h]: è la velocità del laser, anche definita build rate nei cataloghi delle macchine, che stima quanti centimetri cubi l'ora la macchina è in grado di costruire.

Mentre i parametri delle stampanti possono essere in prima approssimazione ricavati dai cataloghi dei costruttori o dal know-how aziendale, quelli relativi ai componenti sono stati dedotti a valle del processo di riprogettazione e ottimizzazione topologica, del posizionamento in piattaforma e della generazione dei supporti.

4.4 Stima parametri dei componenti

Quasi tutti i componenti sono stati inizialmente sottoposti ad una riprogettazione per l'additive manufacturing seguendo i principi alla base del DFAM, "Design for Additive Manufacturing". Grazie all'uso del software "Inspire" è stata eseguita l'ottimizzazione topologica, che ha permesso di ottenere una riduzione di massa significativa e geometrie spesso lontane dai componenti originali.

Il processo di ottimizzazione si è basato su una successione di modifiche volte all'alleggerimento dei componenti, in modo da riportare materiale solo dove effettivamente si ritenesse necessario, cui sono seguite una successione di verifiche per controllare il margine rispetto al valore ammissibile del materiale, le deformazioni e lo stato tensionale. Ottenuta l'ottimizzazione migliore, essa è stata modellata mediante il comando PolyNURBS, la parte CAD free-form del software, al fine di ottenere la geometria definitiva.

Dopo aver terminato la fase di ottimizzazione topologica, grazie al supporto del software "Magics" ogni componente è stato opportunamente posizionato ed orientato all'interno della piattaforma, scegliendo la macchina che ne permettesse la costruzione.

In ultimo è stato possibile stimare i principali parametri relativi al componente:

- L'altezza del job, dal quale si è ricavato il numero dei layer, stabilendo lo spessore del singolo strato;

- Il volume del pezzo;
- Il volume dei supporti.

Per come è stato definito il build time si è optato per un orientamento in macchina che prediligesse un'altezza inferiore, quindi un numero di layer più basso, e che allo stesso tempo permettesse di ottenere un minor volume di supporti. È logico che il posizionamento in macchina debba essere compatibile con i vincoli di progetto legati alla rugosità superficiale, all'interferenza con la racla, all'evacuazione del calore e alla possibilità di distorsione, oltre che alla minimizzazione supporti e riduzione dell'altezza massima, si è ricercato quindi il giusto compromesso tra velocità di stampa e qualità superficiale.

Una riduzione del tempo di stampa si può ottenere anche saturando la piattaforma della macchina, quindi utilizzandola per stampare più componenti contemporaneamente, ciò comporta tra i benefits quello di abbattere il costo orario della macchina e di diluire il tempo di recoating. Tuttavia nel presente modello considereremo il caso di un unico componente sulla piattaforma, evento peraltro più frequente in ambito aerospaziale, in cui non si hanno grandi lotti produttivi, quanto piuttosto pochi pezzi, a volte con geometrie particolari, che ben si prestano alla produzione in additive manufacturing, in quanto l'assenza di utensili costruiti ad hoc per il componente costituisce un grande risparmio in termini economici.

4.5 Stima dei costi

Nel presente modello di costo è stata effettuata una distinzione tra i costi direttamente attribuibili all'additive manufacturing e quelli relativi a processi non correlati alla fabbricazione additiva.

4.6 I costi AM

Le voci di costo strettamente riconducibili all'additive manufacturing sono relative al materiale, alla stampa, alla rimozione dei supporti e al processo di sabbiatura.

| Costi € AM |
|-------------------------------|
| € Materiale |
| € Stampa |
| € Pulizia e sabbiatura |

Tabella 4: Costi AM

4.6.1 Costo del materiale

La materia prima per il processo SLM è la polvere della lega metallica desiderata, la cui produzione rappresenta un tema critico. Le polveri destinate all'AM devono presentare una granulometria molto controllata, oltre che una geometria quanto più sferica possibile, ciò rende il sistema produttivo e le polveri stesse molto costosi. Relativamente alle due leghe metalliche considerate, il costo per chilo di polvere è stato desunto da letteratura e da valori tipici di mercato.

Dato un componente ed il suo volume totale, comprensivo di supporti, si è valutata la sua massa e quindi, conoscendo il costo al chilo della polvere, è stato calcolato il costo del materiale necessario a realizzare quel componente. Non si è considerato, nel costo del materiale, la percentuale di polvere del letto che non può essere riciclata e riutilizzata, in quanto non più conforme alla granulometria richiesta dal processo. Questa assunzione deriva dal fatto che la percentuale di polvere scartata non presenta un significativo impatto sulla stima del costo finale, inoltre si è notato che il costo del materiale influisce in modo marginale rispetto ai costi di stampa.

$$\text{€ Materiale} = \frac{\text{€}}{\text{kg}} \text{Polvere} \cdot \text{Massa}$$

4.6.2 Costo di stampa

Questa voce di costo è altamente influenzata dalla tipologia di stampante 3D impiegata, oltre che dal componente, ed è stata calcolata come il prodotto del build time per il costo orario della macchina. Per quest'ultimo la principale distinzione da fare è quella tra macchine che presentano una sola sorgente laser e quelle multi laser, che riescono a raggiungere valori di produttività decisamente più elevati, ma che allora stesso tempo risultano più costose.

Dai valori medi di mercato si ipotizza 50 €/h per stampanti single laser e 70 €/h per le multi laser.

$$\text{€ Stampa} = \frac{\text{€}}{\text{h}} \text{Macchina} \cdot \text{Build Time}$$

4.6.3 Costo rimozione supporti e sabbiatura

I costi per la pulizia del componente e per la sabbiatura si rifanno principalmente alla percentuale di supporti presenti nel componente e al costo orario dell'operatore predisposto,

dal momento che il costo del lavoro è influenzato dalla sede dell'impianto produttivo, si suppone che la produzione avvenga in Europa occidentale, in cui la manodopera sia di circa 50 €/h e che si impieghi in media circa 4 h per componente.

4.7 I costi non AM

I costi non direttamente attribuibili ai processi di fabbricazione additiva riguardano i costi per la realizzazione dei provini per i test di trazione, per la tomografia computerizzata, considerata una prassi per i componenti spaziali che richiedono un elevato livello di controllo qualitativo, per le lavorazioni meccaniche e per il trattamento termico.

| Costi € non AM |
|------------------------------|
| € Provini |
| € CT-Scan |
| € Post-machining |
| € Trattamento termico |

Tabella 5: Costi non AM

4.7.1 Costo per i provini per il test di trazione

Durante la stampa del componente si realizzano tipicamente anche 3 provini, che verranno impiegati per i test di trazione. Lo scopo di questi provini è quello di verificare la conformità del processo additivo rispetto ai dati precedentemente ottenuti in fase di qualifica, e di identificare opportunamente eventuali derive che possano compromettere la qualità e le proprietà del pezzo finito. Il costo totale si stima intorno ai 250 €.

4.7.2 Costo per la tomografia computerizzata

La tomografia computerizzata è molto diffusa in ambito industriale per l'analisi difettologica di tipo non distruttivo, per individuare eventuali porosità o distorsioni termiche all'interno di un componente che viene colpito dai raggi X. Si tratta della tecnica di ispezione migliore per oggetti di forma complessa realizzati in additive manufacturing, quindi frutto di ottimizzazione topologica, in quanto permette il controllo sia superficiale che volumetrico, per verificare l'assenza di difettosità residue e la bontà del processo produttivo stesso.

Il costo di tale tecnica dipende dall'ingombro del pezzo, quindi dal tipo di macchinario impiegato, si considera un intervallo compreso tra 500€ per pezzi di piccole dimensioni e 2000€ per quelli più grandi. Si ipotizza inoltre che l'analisi venga effettuata da aziende esterne in outsourcing.

4.7.3 Costo di post-machining

Sebbene l'additive manufacturing, ad oggi, permetta di ottenere componenti "near-net-shape", ovvero prossimi al profilo finale, questi ultimi non sono esenti da lavorazioni meccaniche e di finitura superficiale, al fine di ottenere rugosità desiderata, quindi le tolleranze geometriche e dimensionali dettate dalle norme ISO. Nelle tecnologie a letto di polvere si ottengono componenti che as-built presentano rugosità comprese da 4 e 10 μm , per questo motivo solitamente vengono riprese tutte le superfici di accoppiamento ed i fori, oltre alle superfici in cui sono presenti i supporti, che una volta rimossi, lasciano inevitabilmente delle tracce. In molti casi per la finitura superficiale potrebbe essere sufficiente una pallinatura, che genera anche uno stato di compressione superficiale migliorando il comportamento a fatica del pezzo, altre volte è richiesta una lucidatura successiva, ciò dipende dalla funzionalità finale del componente.

Il costo delle lavorazioni meccaniche risulta fortemente influenzato dalla complessità del componente e dal materiale con cui è realizzato. Si potrebbero verificare casi in cui non risultano necessarie parecchie lavorazioni meccaniche, a valle del processo di additive, così come casi in cui si debbano addirittura creare appositi strumenti per lo staffaggio del pezzo per la lavorazione.

Data la libertà nelle geometrie realizzabili, il fissaggio del componente per la lavorazione meccanica è spesso critico, si possono incontrare problemi qualora si abbiano strutture molto alleggerite e fini o nel caso di strutture lattice, in quanto il contatto utensile pezzo potrebbe provocare la deflessione di quest'ultimo o si potrebbe generare un'eccessiva vibrazione del componente durante l'asportazione di truciolo, a scapito dell'accuratezza della lavorazione. Un altro problema, relativo a componenti con geometria molto complessa, è il raggiungimento da parte dell'utensile di tutte le superfici da lavorare, a volte potrebbero servire parecchi posizionamenti. Per questi motivi è bene, già nella fase di progettazione o riprogettazione per l'additive, pensare alle lavorazioni meccaniche e come eventualmente ridurle al minimo.

Bisogna quindi valutare per ogni componente la necessità di strutture di irrigidimento e contenimento delle deflessioni e strutture per il fissaggio in macchina. Spesso si impiegano delle appendici sacrificali, costruite durante il processo di additive e successivamente rimosse, che hanno proprio il compito di permettere l'afferraggio del componente. Un'altra soluzione è l'uso di un'attrezzatura modulabile con dei perni che si adattano alla forma del componente da staffare, non potendo utilizzare i classici piani della morsa.

C'è anche da tenere in conto che lavorare una lega di titanio è molto più difficoltoso rispetto una di alluminio. Per tale ragione si ipotizza che tutti i pezzi abbiano bisogno di lavorazioni meccaniche e si stimano dei valori compresi tra 500€ e 2500€, per i componenti in alluminio, e tra 1000€ e 3000€, per quelli in titanio, per tutte le problematiche esposte precedentemente è bene specificare che si tratta di approssimazioni, ogni componente dovrà essere valutato singolarmente in base alla sua complessità e funzionalità.

4.7.4 Costo del trattamento termico

Altro step fondamentale del ciclo produttivo è il trattamento termico, solitamente si tratta di un trattamento di distensione atto a ridurre le tensioni residue che inevitabilmente si creano durante il processo di costruzione strato su strato di tipo SLM. La temperatura e la durata del trattamento termico dipendono dalla lega e dai parametri di processo utilizzati, oltre che dalla possibilità di riscaldare la piattaforma di costruzione.

Il trattamento tipico di distensione che si effettua per la lega di AlSi10Mg è di 300 °C per 2h, mentre per la lega di Ti6Al4V è di 800 °C per 2 h. Si stimano per entrambi i casi un costo di 500 €.

4.8 Validazione del modello

Una volta individuato il modello di costo si è ritenuto opportuno passare alla fase di verifica e validazione, per controllare che tale modello dia dei risultati aderenti alla realtà, dal momento che sono state introdotte numerose approssimazioni e variabili. È logico che l'accuratezza del modello dipenda dalla numerosità e dall'accuratezza stessa degli input inseriti.

La prima grande approssimazione si ha nel calcolo del build time, che va ad influenzare direttamente il costo di stampa del componente, l'espressione analitica vede al suo interno quattro parametri anch'essi frutto di stime. Mentre le variabili relative al componente sono

piuttosto affidabili, perché, una volta effettuato il posizionamento in macchina, l'altezza del job ed il suo volume sono forniti dal software, i corretti parametri delle macchine risultano invece di più difficile individuazione, sia perché i cataloghi dei produttori forniscono dei valori indicativi e spesso ottimistici, sia perché ogni utilizzatore modifica i parametri macchina in funzione del risultato che vuole raggiungere.

Altre approssimazioni importanti riguardano i costi di sabbiatura e rimozione supporti, così come quelli relativi alle lavorazioni meccaniche, che dipendono fortemente dal componente in esame, e quindi possono variare anche di molto rispetto al valore assunto nel modello.

Per la validazione sono stati confrontati i valori ottenuti mediante il modello di costo con quelli noti di componenti costruiti in passato in additive manufacturing per TAS o candidati a nuove applicazioni. I fornitori esterni però presentano produttività e costi di produzione molto dissimili tra loro e spesso, per costruire un medesimo componente si può trovare un'ampia variabilità del costo. I principali fattori che intervengono nella fluttuazione del costo sono: la tipologia di macchina a disposizione; la relativa scelta dei parametri, al fine di prediligere la velocità di stampa piuttosto che la qualità superficiale; la saturazione della piattaforma; la possibilità di realizzare internamente le fasi di lavorazione meccanica, tomografia e trattamento termico.

4.8.1 Le approssimazioni per validare il modello

Al fine di effettuare correttamente il confronto, si è applicato il modello di costo ai vari componenti, scegliendo di volta in volta la stessa stampante industriale e lo stesso spessore dello strato del fornitore che lo aveva prodotto.

Il primo passo è stato quello di calcolare i build time e quindi stimare correttamente i parametri delle macchine. In particolar modo il tempo di recoating non è fornito nei cataloghi, tuttavia in letteratura è stato trovato che, per una EOS M270 che presenta una piattaforma di 250x250 mm, la racla impiega all'incirca 10 s, da questo valore sono state fatte delle proporzioni per ricavare i tempi di recoating per le altre macchine con piattaforme di dimensioni maggiori. Si è anche tenuto in considerazione il fatto che la stampante possa presentare uno o due feeding systems, quindi che la racla abbia bisogno, rispettivamente, di due o una sola traslazione lungo la piattaforma per spandere il layer di polvere.

Relativamente alla velocità del laser, o build rate, si tratta di un parametro soggetto a numerose incertezze, che spesso nei cataloghi viene fornito come parametro consigliato, in funzione della tipologia di materiale o come valore indicativo, che sarà quello preso in considerazione in tale stima.

Una volta stimati i parametri macchina che concorrono alla determinazione del build time, si è passati ad analizzare i parametri relativi ai componenti, in particolare l'approssimazione maggiore riguarda il volume dei supporti, che dipende principalmente dal posizionamento in macchina del componente. Ai fini della comparazione si è cercato di riportarsi nelle condizioni di orientamento nella piattaforma quanto più simili a quelle fornite a TASI per i vari componenti.

Infine si è applicato il modello di costo, con tutte le stime di cui si è discusso in precedenza, quindi è stato possibile determinare tutte le voci di costo AM e non AM ed il costo finale, che è stato raffrontato al costo dei vari fornitori.

L'iter seguito è riportato di seguito:

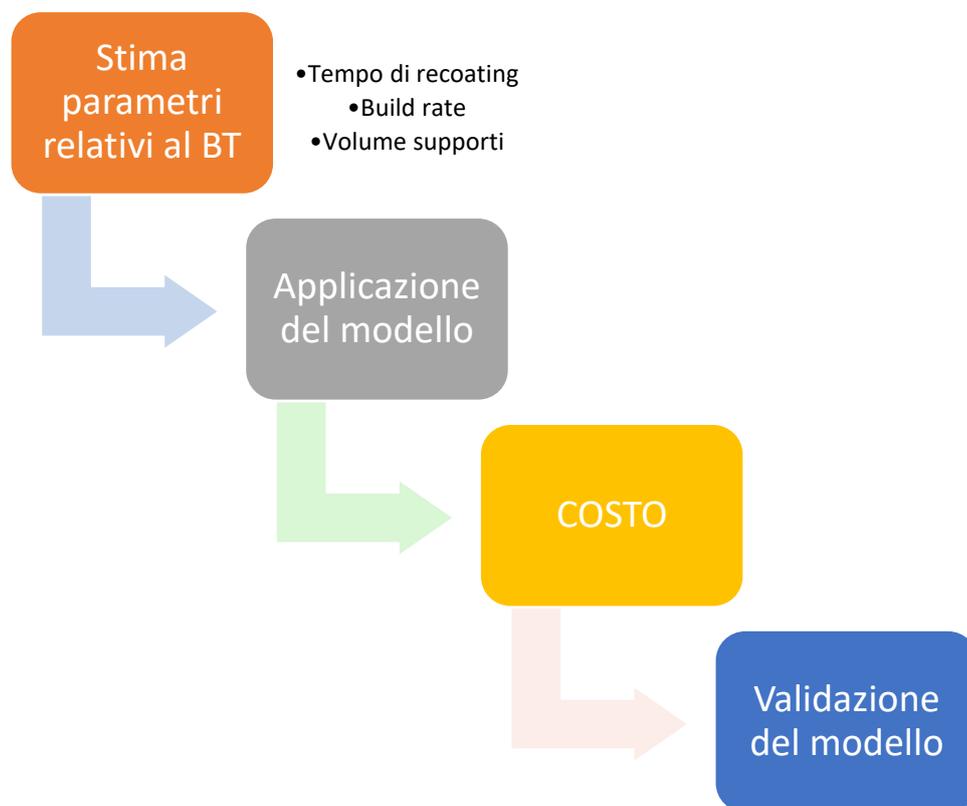


Figura 78: Iter seguito per giungere alla validazione del modello di costo

4.9 Conclusioni

Nella stima del build time quindi sono insite molte incertezze, ma ciononostante nella maggior parte dei casi sono stati ottenuti valori che poco si discostano da quelli dichiarati dai fornitori, con differenze dell'ordine di un paio di ore, solitamente in eccesso. Ciò è compatibile con la modifica dei parametri macchina rispetto ai valori nominali, come prassi da parte dei produttori, al fine di migliorare le performance e la produttività della macchina stessa.

In taluni casi, invece, i build time si discostano parecchio da quelli dichiarati dai fornitori, ciò può essere imputabile ad errori di stima delle variabili relative ai componenti o al fatto che i produttori forniscano dei tempi comprensivi della rimozione supporti o tempi ottenuti per componenti realizzati con piattaforme sature.

Per quanto concerne i costi si è notato un buon riscontro con il modello nel caso di produttori che hanno fornito la quotazione per la realizzazione di un singolo componente sulla piattaforma. Gli errori sono principalmente in difetto rispetto al valore delle quotazioni, quindi attraverso il modello si sovrastima il costo finale del componente. Considerato che l'obiettivo del modello è quello di fornire un ordine di grandezza del costo di un componente, che si vorrebbe produrre in additive manufacturing, si possono ritenere accettabili errori massimi percentuali del 25-30%, quali quelli che si sono ottenuti.

Nel caso di produttori che invece hanno fornito il costo di un componente realizzato con piattaforma satura, come era prevedibile si è notato un risparmio non indifferente rispetto ad altre aziende e al modello stesso. Per tale ragione per una stima migliore si è calcolato il build time per gli n componenti posizionati in piattaforma, come:

$$BT = (t_R \cdot N) + \left(V_{tot} \cdot n / v_{LAS} \right)$$

Si è valutato il costo totale relativo all'additive manufacturing e poi si è diviso per gli n pezzi realizzati.

In questo caso, effettuando un confronto limitatamente ai costi AM, applicando il modello e considerando la produzione del singolo componente, il costo risulta sovrastimato; con il metodo appena proposto, considerando la piattaforma satura, quindi i build time ed i costi totali, il costo del medesimo componente è invece leggermente sottostimato rispetto alle quotazioni. Si può quindi concludere che il costo AM di quel pezzo sarà compreso in quel

range, tuttavia le percentuali di errore saranno più basse nel secondo caso. Ragion per cui, nel caso di saturazione della piattaforma, si ritiene più corretto il secondo procedimento, dal momento che permette di ottenere un costo finale che risulta maggiormente aderente a quello delle quotazioni ricevute.

Relativamente ai costi non AM in generale, si può notare sempre una leggera sovrastima del modello rispetto i valori forniti dai produttori, tale sovrapprezzo è dovuto principalmente alla difficoltà nel valutare, in modo approssimato, le lavorazioni meccaniche necessarie. Inoltre alcuni produttori riescono a ridurre i costi della tomografia computerizzata perché posseggono il macchinario e non devono rivolgersi a suppliers esterni per l'ispezione, come invece è stato ipotizzato in tale modello. In definitiva l'approssimazione di tale voce di costo, benché richieda ulteriori valutazioni in funzione dei singoli componenti, si può ritenere soddisfacente.

In conclusione si può affermare che il modello di costo fornisce dei risultati con percentuali di errore accettabili, se applicato a componenti, e contestualmente a macchine, di dimensioni non troppo elevate, infatti sia i costi AM che quelli non AM si discostano non in maniera considerevole dai valori indicati nelle quotazioni usate per la validazione.

Tuttavia si osserva che il modello presenta delle criticità nella stima dei costi di produzione, nel caso di componenti di grandi dimensioni, quindi realizzati con stampanti molto grandi. L'errore maggiore si riscontra in particolare nei costi AM, in cui si raggiunge un massimo scostamento del 50% rispetto al valore corretto, i costi non AM, che invece risultano ancora ben stimati, permettono di ridurre l'errore sul costo totale, ma non ad una percentuale ammissibile.

Capitolo 5: Casi Applicativi - Trade Off

5.1 Presentazione del caso applicativo

Una volta conclusa la fase di validazione del modello di costo ci si è concentrati sull'applicazione di tale modello ad un caso studio specifico, realizzando un confronto con le tecnologie convenzionali, al fine di verificare la convenienza e la fattibilità in additive manufacturing.

Dapprima sono stati presi in considerazione diversi componenti tra quelli proposti da Thales Alenia Space, per ognuno si è studiato il design tradizionale e valutata la necessità di realizzare un'ottimizzazione topologica, al fine di ottenere una geometria ad hoc per l'additive manufacturing. Per alcuni componenti l'ottimizzazione topologica è stata eseguita e si è rivelata essenziale per la riduzione di peso e la realizzazione di una geometria altamente reticolata, facilmente ottenibile con le tecnologie additive; per altri componenti invece, a causa della loro funzione e di vincoli di progetto, non si è potuto agire sulla geometria e sul loro snellimento.

Tra i componenti concessi da Thales Alenia Space, possibili candidati alla realizzazione in fabbricazione additiva, la scelta è ricaduta su due adattatori: l'IMV Adapter Internal e l'IMV Adapter External.

5.2 L'IMV Adapter

Gli Inter-Module Ventilation, o più semplicemente IMV, Adapter sono dei adattatori, all'interno dei quali passa aria, che hanno la principale funzione di creare un collegamento per l'aerazione tra due moduli della stazione spaziale internazionale (ISS), a seguito delle operazioni di docking.

Essi presentano alle loro estremità delle flange di accoppiamento con lo sportellone del modulo, tali flange sono di forma rettangolare e presentano delle cave per le guarnizioni, in quanto devono essere a tenuta, permettendo dunque il fluire dell'aria da un modulo all'altro.

La loro geometria attuale è stata recentemente modificata a seguito della variazione del sistema di docking con cui si agganciano i diversi moduli.

5.3 ECLSS

L'IMV Adapter è un componente che permette dunque l'aerazione tra due moduli e fa parte, più in generale, dell'ECLSS, ovvero Environmental Control and Life Support System.

L'ECLSS è un sistema che provvede al supporto della vita sulla Stazione Spaziale Internazionale, è addetto a svolgere numerose funzioni, anche se la massima priorità riguarda il controllo dell'atmosfera dell'ISS. È stato sviluppato, costruito e testato dalla NASA nel Marshall Space Flight Center in Huntsville, Alabama.

Le prime missioni spaziali degli anni '60, prevedevano un sistema di supporto vitale progettato per essere impiegato una volta e successivamente dismesso. Tutti i beni essenziali per la vita nello spazio, dall'ossigeno all'acqua, erano immagazzinati in serbatoi, i contaminanti presenti nell'aria venivano rimossi mediante filtri sostituibili, mentre le urine e le acque di scarico erano raccolte e depositate o convogliate all'esterno del veicolo. Questo modo di operare è risultato accettabile fintantoché tali missioni hanno avuto un tempo limitato nello spazio e le navicelle spaziali sono state adoperate per singole missioni. Con l'arrivo dello Space Shuttle, un veicolo riutilizzabile, anche il sistema di supporto vitale ha subito delle migliorie, anche se è ancora fortemente dipendente dall'uso di beni immagazzinati e non rinnovabili.

È con il lancio dei primi moduli dell'ISS che l'ECLSS è stato ulteriormente implementato, al fine di garantire un supporto vitale che si basi su beni che possono essere riconvertiti e rigenerati. Sono stati infatti sviluppati metodi che permettono di generare ossigeno dall'elettrolisi dell'acqua, e altri che consentono di riciclare l'acqua convertendola in acqua potabile. Questi miglioramenti hanno permesso di ridurre i costi operativi della stazione spaziale perché non è stato più necessario inviare frequentemente rifornimenti di aria e acqua.

Le principali funzioni che è chiamato a svolgere l'ECLSS sono:

1. Fornire ossigeno per la respirazione dei membri dell'equipaggio;
2. Rimuovere la CO₂ dall'aria presente nella cabina;
3. Recuperare e riciclare l'ossigeno dalla CO₂;
4. Filtrare particelle e microorganismi dall'aria presente in cabina e mantenere i livelli di pressione, temperatura e umidità;
5. Rimuovere tracce di gas organici volatili;

6. Distribuire l'aria tra le stanze o i moduli dell'ISS;
7. Provvedere all'acqua potabile per il consumo, la preparazione di cibi e l'igiene personale;
8. Riciclare l'acqua proveniente da diverse fonti riconvertendola in acqua potabile.

L'Environmental Control and Life Support System include tre componenti fondamentali: il Water Recovery System, l'Air Revitalization System e l'Oxygen Generation System, che rispettivamente si occupano di recuperare l'acqua, ripulire l'aria e di generare ossigeno.

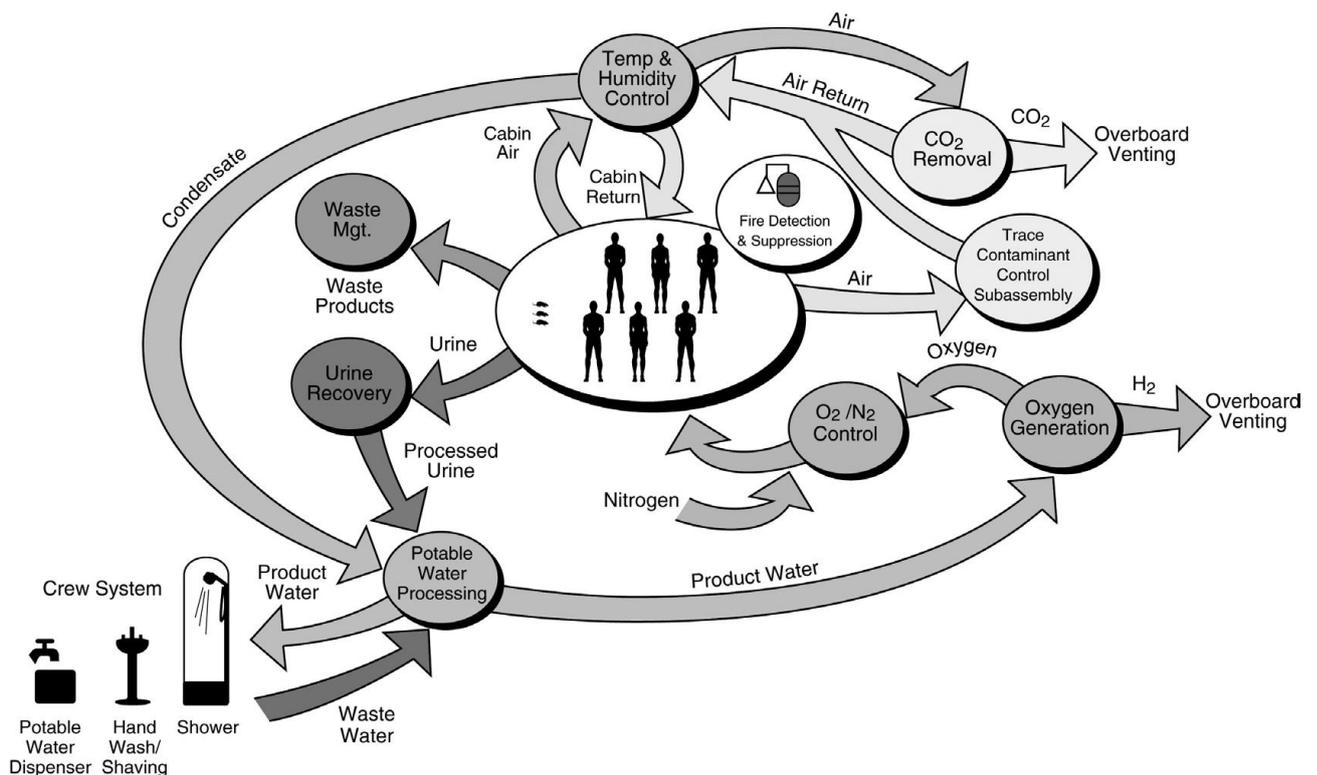


Figura 79: Diagramma Environmental Control and Life Support System [25]

5.3.1 Water Recovery System

Il Water Recovery System si occupa di fornire acqua pulita riciclandola dalle acque reflue, comprese le urine dei membri dell'equipaggio, dall'umidità e dal sistema di idratazione posto all'interno delle tute per le Attività Extra Veicolari (EVA: Extra Vehicular Activity) degli astronauti. L'acqua riciclata deve rispettare degli standard di purezza molto stringenti, prima di essere impiegata nuovamente dall'equipaggio.

Il Water Recovery System è composto da:

- Urine Processor Assembly (UPA), che si occupa recuperare l'acqua dalle urine mediante un processo di distillazione in vuoto a bassa pressione;
- Water Processor Assembly (WPA), che raccoglie l'acqua proveniente dall'UPA e dalle altre fonti di scarto, provvedendo al suo trattamento e purificazione.

Nel WPA la depurazione dell'acqua segue diverse fasi. Inizialmente l'acqua entra nel depuratore che si occupa della rimozione delle bolle di gas dal liquido, in seguito si utilizza un filtro che riesce a trattenere ed intrappolare tutte le particelle aventi diametro superiore a 0.5 micron, successivamente l'acqua passa attraverso una superficie che contiene materiale a scambio ionico, al fine di rimuovere la maggior parte dei contaminanti, infine è riscaldata oltre i 100°C e convogliata attraverso un catalizzatore per eliminare le ultime molecole ed ottenere l'acqua pronta per essere utilizzata.

L'acqua inaccettabile dal punto di vista degli standard di purezza viene nuovamente sottoposta al trattamento, alla fine del processo l'acqua pulita è inviata ad un serbatoio per lo stoccaggio e pronta per l'uso. Attualmente si riesce a recuperare circa il 90% dell'acqua all'interno della stazione spaziale, riuscendo così a ridurre la quantità di acqua che dovrebbe essere lanciata dalla Terra per soddisfare il fabbisogno dell'equipaggio. Ogni astronauta, infatti, necessita di più di 4 litri di acqua al giorno, almeno 2 litri sono da bere, la restante parte serve per la preparazione dei pasti e l'igiene personale.

L'acqua sulla Stazione Spaziale Internazionale è un bene costoso, in quanto non è continuamente disponibile e per trasportarne un litro dalla Terra si spende circa 20.000 euro, inoltre è una risorsa limitata perché lo spazio per il suo stoccaggio è altrettanto limitato.



Figura 80: L'acqua è un drink costoso nello spazio [26]

5.3.2 Air Revitalization System

L'Air Revitalization System è dedicato alla pulizia dell'aria circolante nei moduli, in particolare modo si occupa della rimozione di contaminanti e biossido di carbonio, provvedendo anche al controllo della composizione dell'aria. L'anidride carbonica viene rimossa attraverso un setaccio molecolare, che riesce a separare i gas in base alla loro dimensione.

5.3.3. Oxygen Generation System

L'Oxygen Generation System provvede alla produzione di ossigeno per la respirazione dell'equipaggio. Il sistema è composto da:

- Oxygen Generation Assembly (OGA);
- Carbon Dioxide Reduction Assembly (CDRA).

L'OGS si avvale dell'elettrolisi dell'acqua, proveniente dal Water Recovery System, per generare ossigeno e idrogeno. L'ossigeno, elemento principale prodotto dall'OGS, viene opportunamente miscelato per comporre l'aria da respirare, mentre l'idrogeno, che prima era considerato uno scarto e veniva semplicemente espulso al di fuori della stazione, adesso è inviato al CDRA, che lo usa insieme all'anidride carbonica emessa dai membri dell'equipaggio in un reattore di Sabatier. In questo modo si chiude il circuito dell'ECLSS, in quanto si sfrutta la reazione di Sabatier per recuperare ulteriore acqua e ridurre la quantità che deve essere rifornita alla ISS da Terra. Infatti si fa reagire ad alta temperatura e pressione l'idrogeno, derivante dall'OGS, e l'anidride carbonica, emessa dalla respirazione, in presenza di un catalizzatore a base di nichel, al fine di ottenere metano, che viene rilasciato nello spazio, e acqua, che è appunto riutilizzata dagli astronauti.

5.3.4 Fire Detection and Suppression

Altri due sottosistemi dell'ECLSS, altrettanto importanti, sono il Fire Detection and Suppression (FDS) e il Temperature and Humidity Control (THC).

Il primo è dotato di rilevatori di fumo, estintori, respiratori portatili, oltre che un sistema di allarme per avvertire l'equipaggio e un sistema software che, in modo automatico, realizza delle azioni volte alla soppressione del fuoco o delle cause che lo hanno innescato.

5.3.5 Temperature and Humidity Control

Il secondo sottosistema (THC) controlla la temperatura e l'umidità all'interno della ISS, aiutando a mantenere un ambiente vivibile, eliminando calore e umidità e favorendo la circolazione continua di aria secca pulita.

Il Temperature and Humidity Control è attrezzato principalmente con:

- Ventole, per garantire una movimentazione dell'aria attraverso la stazione spaziale;
- Scambiatori di calore, che servono a controllare e regolare l'umidità;
- Un sistema di distribuzione per fornire l'aria fresca agli astronauti.

L'aria che passa attraverso gli scambiatori di calore si raffredda, si verifica la condensazione dell'acqua presente nell'aria e quest'ultima viene raccolta e inviata al Water Recovery System per essere processata.

L'umidità deve essere sempre mantenuta sotto controllo e rispettare degli standard stringenti, in quanto se troppo elevata può causare danni alla salute degli astronauti, ma anche alla stazione spaziale stessa. Così come sulla Terra, anche nello spazio alti valori di umidità possono favorire la proliferazione di microorganismi e, di conseguenza, si hanno maggiori probabilità che le persone dell'equipaggio si ammalinino. Allo stesso tempo se l'ambiente è troppo umido si può accumulare della condensa nei moduli dell'ISS, all'interno dei quali, però, sono presenti numerosi dispositivi elettronici, che potrebbero andare in corto circuito o nelle peggiori delle ipotesi potrebbero innescarsi degli incendi.

5.4 Le risorse sulla Stazione Spaziale Internazionale

Le risorse primarie per la sopravvivenza degli astronauti nello spazio sono limitate e scarse, questo permette di comprendere il perché le prestazioni dell'Environmental Life Support System siano volte alla massimizzazione del riciclo tali risorse. Non è da sottovalutare neanche il fatto che risulta economicamente oneroso inviare dalla Terra continui approvvigionamenti.

Attualmente si sta lavorando per perfezionare ulteriormente l'ECLSS e per ridurre al minimo i rifornimenti dei beni di prima necessità, anche nell'ottica delle future missioni nel cosiddetto "deep space", in cui ogni risorsa non potrà essere sprecata. Per via delle distanze piuttosto elevate non sarà possibile mandare continue provviste e allo stesso tempo non ci sarà spazio a sufficienza per inviarne parecchie direttamente all'interno dei veicoli spaziali.

Il sistema di supporto vitale sulla ISS è adeguatamente progettato per riciclare il più possibile le materie prime come l'acqua, per minimizzarne il consumo e gli sprechi e rendendo il suo utilizzo efficiente. [27]



Figura 81: L'astronauta Frank De Winne che cambia il gruppo di distillazione dell'UPA [27]

Nella Figura 81 si può osservare l'astronauta dell'ESA (Agenzia Spaziale Europea) Frank De Winne sulla Stazione Spaziale Internazionale intento a cambiare il gruppo di distillazione dell'UPA, del Water Recovery System.

Oltre le urine, all'interno della ISS vengono riciclati anche il sudore e l'anidride carbonica, generati dai membri dell'equipaggio, ad esempio durante i loro allenamenti, riconvertendoli in acqua e aria pulita.



Figura 82: Samantha Cristoforetti che si allena sulla ISS [27]

Nella Figura 82 è mostrata l'astronauta italiana Samantha Cristoforetti mentre si allena sul CEVIS, Cycle Ergometer with Vibration Isolation and Stabilization.

In questa foto, invece, l'astronauta della NASA Kjell Lindgren prepara il caffè, con l'acqua riciclata dal Water Recovery System, impiegando una "Space Coffee Cup", una particolare tazza che permette agli astronauti di bere come se fossero sulla Terra, senza che il liquido fluttui per l'assenza di gravità.



Figura 83: L'astronauta Kjell Lindgren che prepara un caffè [27]

La tecnologia alla base dell'ECLSS è stata adottata anche sulla Terra, in particolar modo per aiutare quelle aree isolate e remote o luoghi devastati da disastri ambientali in cui non si ha accesso all'acqua pulita. Ci si augura, in futuro, di non aver bisogno della tecnologia per avere a disposizione le materie prime per il sostentamento della vita sulla Terra, nello spazio si tratta di una necessità indispensabile. È bene sensibilizzare le generazioni attuali, relativamente il riciclo dei beni di consumo ed il loro spreco, in quanto essi hanno pur sempre una durata limitata sulla Terra. [27]

5.5 Air distribution

Un altro aspetto fondamentale per la Stazione Spaziale internazionale è l'aerazione dei moduli. Sulla Terra l'aria è mossa grazie alle correnti convettive generate dall'aria calda, che più leggera sale verso l'alto, e l'aria fredda che essendo più pesante va verso il basso. In assenza di gravità non c'è la distinzione tra aria leggera e pesante, quindi non si verifica

nemmeno l'effetto delle correnti convettive. Risulta di vitale importanza prevedere e progettare adeguatamente il sistema di aerazione forzata, perché banalmente senza i ventilatori l'anidride carbonica espulsa durante il sonno degli astronauti rimarrebbe bloccata in una bolla attorno alla loro testa e non circolerebbe, oppure si potrebbero trovare zone all'interno dei moduli in cui non è presente ossigeno.

Per un'opportuna ventilazione sono stati creati modelli fluido dinamici e sono state condotte diverse analisi: per mappare la velocità dell'aria, per comprendere la capacità di rinnovare l'aria all'interno della cabina, così come garantirne una corretta qualità e verificare il corretto rilevamento di fumo, in caso di eventuali incendi.

Come discusso precedentemente, l'ECLSS si occupa anche di questo aspetto attraverso il Temperature and Humidity Control.

In Figura 84 si può osservare uno schema semplificato del THC, con particolare riferimento alla ventilazione del laboratorio spaziale Columbus, il maggior contributo dell'ESA alla Stazione Spaziale Internazionale, all'interno del quale si effettuano diversi esperimenti scientifici in condizioni di microgravità. Nell'immagine si notano i principali componenti del THC: le ventole per muovere l'aria nei condotti per alimentare la cabina di Columbus (Cabin Fan) o per scambiare aria con gli altri moduli (IMV Fans: Inter Module Ventilation Fans); il filtro per l'aria; lo scambiatore di calore a condensazione per controllare l'umidità (Condensing Heat Exchanger) e l'elemento che raccoglie l'acqua condensata (Condensate Water Separator), infine i diffusori per immettere l'aria in cabina (Ventilation Air Inlet) e le griglie di ritorno dell'aria (Air Return).

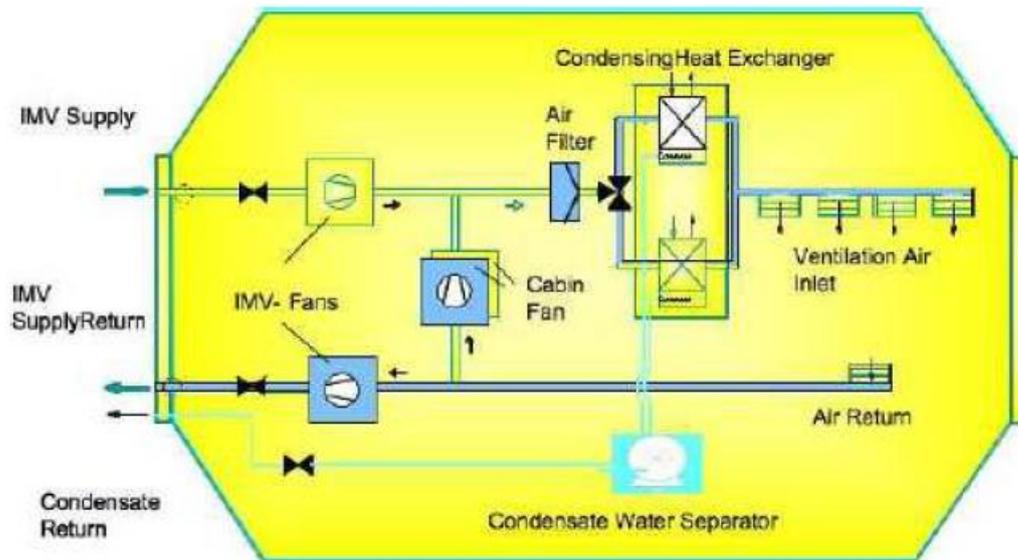


Figura 84: Schema del Temperature and Humidity Control [28]

Columbus, a differenza degli altri moduli logistici temporanei, è un modulo permanente dell'ISS ed è ad essa collegato mediante il Nodo 2, detto Harmony. Il laboratorio scientifico quindi scambia aria col Nodo 2, per mezzo di ventole e valvole, ciò si può osservare più dettagliatamente nella Figura 85, che raffigura lo schema del circuito di aerazione.

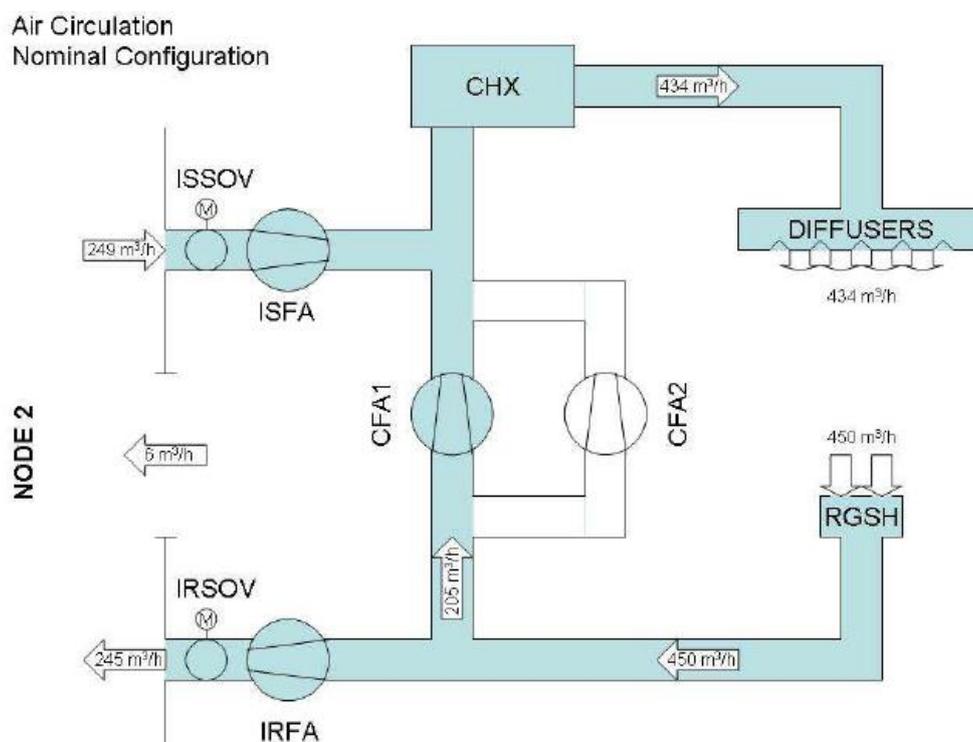


Figura 85: Schema del circuito di aerazione di Columbus [28]

In condizioni nominali la ventilazione all'interno del modulo avviene mediante due ventole, le "Cabin Fan Assemblies" (CFA1 e CFA2) che operano in modo ridondante, mentre si provvede all'aerazione tra Columbus ed il Nodo 2 con il contemporaneo funzionamento di altre due ventole denominate ISFA (IMV Supply Fan Assembly) e IRFA (IMV Return Fan Assembly), anch'esse operanti in modo ridondante. Infatti la messa in servizio della sola ISFA e la chiusura dell'IRFA, effettuata mediante la sua rispettiva valvola, sarebbe sufficiente a garantire il flusso di aria tra i due moduli, in tal caso l'aria spinta dall'ISFA nel Columbus tornerebbe al Nodo 2 mediante lo sportello che collega i due moduli, che rimane sempre aperto. Situazione analoga si verificherebbe qualora l'ISFA fosse disattiva e l'IRFA attiva, quest'ultima spingerebbe un flusso d'aria da Columbus al Nodo 2 attraverso i condotti per l'Inter Module Ventilation, mentre un flusso d'aria si dirigerebbe all'interno di Columbus attraverso il portello di connessione dei moduli. [28]

5.6 Applicazione del modello di costo agli IMV Adapter

5.6.1 Re-Desing

Gli IMV Adapter si distinguono in Internal ed External in funzione del fatto che si trovino internamente o esternamente il modulo. Sono dei componenti per i quali non si è realizzata una ottimizzazione topologica e sono molteplici le ragioni che non hanno permesso una modifica della loro geometria, per altro da poco ritoccata.

In primo luogo non è stato possibile attuare degli alleggerimenti facendo ricorso ad una struttura reticolare, molto diffusa per i componenti fabbricati mediante le tecniche additive, a causa della funzione degli adattatori stessi, che devono permettere il fluire dell'aria al loro interno e di conseguenza è stata esclusa una modifica in tal senso.

Entrambi gli IMV Adapter sono muniti alle loro estremità di due flange, che presentano una forma predefinita e non modificabile, perché sono l'elemento di interconnessione con i moduli. In particolare l'IMV Internal presenta una flangia circolare da una parte, che si collega ad un flessibile circolare, e la flangia rettangolare a tenuta dall'altra che si interfaccia col portellone; l'IMV External presenta la medesima flangia rettangolare a tenuta dell'Internal, per connettersi al portellone, mentre dall'altra parte si collega al restante sistema di aerazione con un elemento di forma ellettica.



Figura 86: IMV Internal (sinistra) e IMV External (destra)

Lo spazio a disposizione per tali elementi è dettato anche dalla presenza di numerosi altri componenti che servono per l'interfaccia tra i due moduli, per cui una geometria diversa avrebbe potuto entrare in conflitto con la configurazione di tutte le restanti parti.

Tutti questi motivi hanno portato alla decisione di non stravolgere nuovamente la forma degli IMV Adapter, che già si presenta particolare e sicuramente adatta alla produzione in additive manufacturing.

5.6.2 Stima del Build time

Si è supposto di realizzare i due componenti scelti per l'applicazione del modello di costo, nella lega di alluminio più comunemente utilizzata per il processo di Selective Laser Melting, ossia la lega AlSi10Mg. L'AlSi10Mg è una lega saldabile pensata per essere lavorata con le tecnologie di additive manufacturing, presenta una densità di $2,66 \text{ g/cm}^3$ e mediamente 1 kg di polvere costa 110 €.

La stampante industriale scelta è la SLM500 di SLM Solutions, che presenta una piattaforma di dimensioni $500 \times 280 \times 365 \text{ mm}$ e 4 laser da 700 W, che consentono di ottenere una velocità di costruzione di $170 \text{ cm}^3/\text{h}$. Lo spessore dei layer può variare da 20 a $90 \text{ }\mu\text{m}$, ma per la lega di AlSi10Mg un valore standard impiegato è di $60 \text{ }\mu\text{m}$. Seppure sia una stampante di dimensioni non troppo elevate si è ipotizzato un costo orario di 70 €/h per via della presenza dei 4 laser.

A questo punto si è proseguito lo studio dei due casi ricavando i parametri necessari per la stima del build time, tutti dipendenti da come i due IMV Adapter sono stati orientati all'interno del volume di lavoro. Ricordiamo che l'orientamento influenza: il tempo necessario alla stampa, la qualità superficiale ottenibile, la necessità e la quantità dei supporti, le fasi

successive di post processing che si dovranno realizzare, la possibile failure del job, ma anche la possibilità di inserire più componenti per saturare la piattaforma.

Nel presente studio si è scelto di considerare la produzione di un singolo componente in piattaforma, trovando un giusto compromesso tra minimizzazione dei supporti e build time ed ottimizzazione della qualità ricavabile dal processo di stampa.

L'orientamento in piattaforma è stato simulato grazie al software di Materialise, Magics che consente di effettuare anche un confronto tra i vari posizionamenti all'interno del volume di lavoro per prediligere i minimi supporti o la minima altezza lungo l'asse z. Tale software ha fornito il volume esatto dei due IMV Adapter in analisi, il volume dei supporti, nell'orientamento prescelto, l'altezza del job, grazie alla quale si è calcolato il numero dei layer necessari.

Per l'IMV Adapter Internal l'orientamento è mostrato in Figura 87

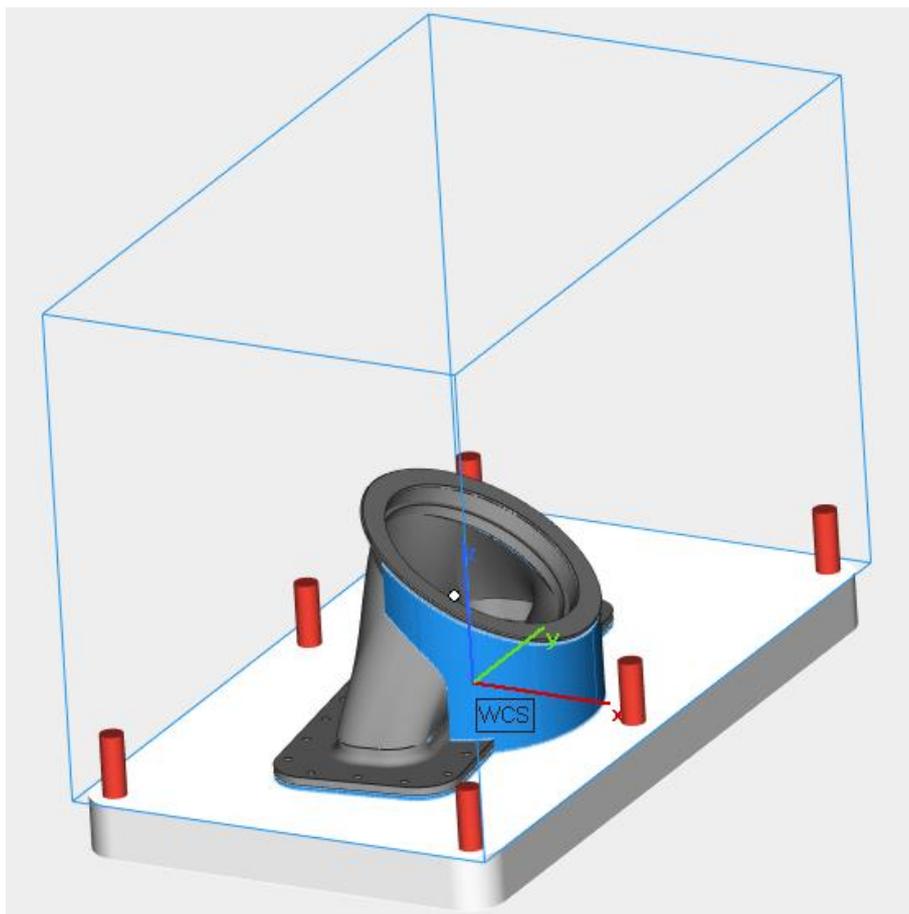


Figura 87: Orientamento dell'IMV Internal nel volume di lavoro del SLM 500 e strutture di supporto

In Tabella 6 sono riportati i valori ottenuti:

| | |
|----------------------------|------------------------|
| Volume IMV Internal | 285,97 cm ³ |
| Volume supporti | 104,96 cm ³ |
| Volume totale | 390,93 cm ³ |
| Altezza job | 13,44 cm |
| Numero layer | 2240,34 |

Tabella 6: Parametri dell'IMV Internal

Si è dunque calcolato il build time come:

$$BT = (t_R \cdot N) + (V_{tot} / v_{LAS})$$

Ottenendo un valore di circa 12 h.

Per quanto riguarda l'IMV Adapter External, l'orientamento è rappresentato in Figura 88.

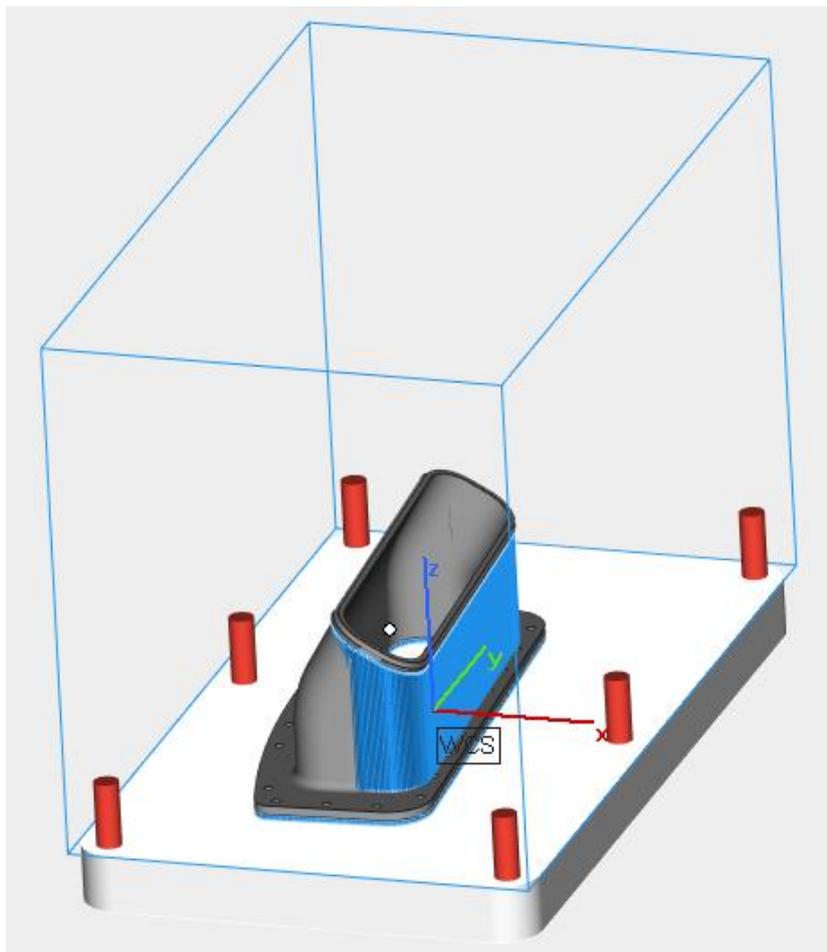


Figura 88: Orientamento dell'IMV External nel volume di lavoro del SLM 500 e strutture di supporto

In Tabella 7 sono riassunti i parametri ottenuti:

| | |
|----------------------------|------------------------|
| Volume IMV External | 264,25 cm ³ |
| Volume supporti | 36,5 cm ³ |
| Volume totale | 300,75 cm ³ |
| Altezza job | 11,07 cm |
| Numero layer | 1845,66 |

Tabella 7: Parametri dell'IMV External

Il build time ottenuto è di 9h e 46 min.

5.6.3 Stima del costo degli IMV Adapter

Una volta ricavati i build time dei due componenti si procede al calcolo dei costi relativi all'additive manufacturing e di quelli non direttamente attribuibili al processo di produzione.

Per quanto concerne i cosiddetti Costi AM, si tratta del costo relativo alla polvere impiegata per l'effettiva costruzione del componente, alla stampa e alla fase di rimozione supporti e sabbiatura.

Noto il volume dei due adattatori e la densità della polvere di AlSi10Mg si è valutato i chilogrammi di polvere necessari, poi dal costo al chilo della polvere il costo effettivo del materiale.

| | Quantità di polvere | € Materiale |
|-----------------------------|----------------------------|--------------------|
| IMV Adapter Internal | 1,040 kg | 114,39 € |
| IMV Adapter EXternal | 0,800 kg | 88 € |

Tabella 8: Costo del materiale per i due IMV

Dal Build time e dal costo orario della SLM500 si ricava il costo effettivo di stampa:

| | Build Time | € Stampa |
|-----------------------------|-------------------|-----------------|
| IMV Adapter Internal | 12 h | 840 € |
| IMV Adapter EXternal | 9h 46min | 683,9 € |

Tabella 9: Costo di stampa per i due IMV

Infine si è supposto che l'operatore, addetto alla rimozione supporti e alla sabbiatura, impieghi circa 2 h per componente, dato che sono presenti pochi supporti, che si trovano esternamente i due componenti e quindi facilmente raggiungibili e rimovibili. Quindi si stima 100 € ad adattatore per questa fase di post produzione.

In definitiva, sommando le tre voci di costo si ottiene per i due IMV Adapter un costo relativo alla produzione in Selective Laser Melting di:

| | € Additive Manufacturing |
|-----------------------------|---------------------------------|
| IMV Adapter Internal | 1054,39 € |
| IMV Adapter EXternal | 871,9 € |

Tabella 10: Costo dell'Additive Manufacturing

A questi costi vanno aggiunti quelli non relativi all'additive manufacturing che tengono conto: della produzione di 3 provini, sui quali vengono effettuate le prove di trazione, della tomografia, del trattamento termico e delle lavorazioni meccaniche necessarie per ottenere le tolleranze richieste.

Si stima un costo di 250 € per la realizzazione dei 3 provini e per le successive prove a trazione. Per la tomografia, essendo due componenti di dimensioni non troppo grandi si suppone che in outsourcing ci vogliano circa 1000 € ad adattatore. Relativamente al trattamento termico, per le leghe di alluminio a seguito del processo di SLM è sufficiente una distensione per il rilascio delle tensioni interne, quindi si stima un costo di 500 € a componente. Infine per quanto riguarda le lavorazioni meccaniche, si devono riprendere tutti i fori, si devono lavorare le superfici delle flange, che sono di accoppiamento con lo sportellone del modulo, inoltre si devono realizzare le cave per le guarnizioni. Per ogni componente si può stimare circa 1000 € per le lavorazioni meccaniche, che includono anche eventuali attrezzature per lo staffaggio.

In definitiva il costo finale per i due Inter Module Ventilation Adapter è:

| | € Finale |
|-----------------------------|-----------------|
| IMV Adapter Internal | 3804,39 € |
| IMV Adapter EXternal | 3621,9 € |

Tabella 11: Costo finale degli IMV

5.8 Trade off

Gli Inter Module Ventilation Adapter ad oggi non sono mai stati prodotti, né con le tecnologie tradizionali né in fabbricazione additiva. La loro progettazione molto probabilmente è stata realizzata prescindendo dal processo produttivo che si sarebbe intrapreso, ma con la consapevolezza delle grandi libertà di design che l'additive manufacturing offre.

Gli adattatori presentano una geometria che ben si adatta per la produzione in selective laser melting sotto molteplici aspetti, che ne escludono invece la costruzione mediante le tecnologie tradizionali.

Se si pensa alle lavorazioni sottrattive, che partono da un blocco pieno, si possono notare delle difficoltà nel raggiungimento di tutte le superfici da parte dell'utensile, poiché sono presenti dei sottosquadri importanti. Molto probabilmente sarebbe opportuno una modifica della geometria di entrambi i componenti al fine di rendere fattibile tali lavorazioni, con un costo che si può stimare in un range che va da 700 € ai 1500 €, senza tener conto della innumerevole quantità di materiale di scarto.

È da escludere anche la possibilità di costruire gli adattatori in più parti e poi successivamente assemblarli con saldatura TIG (Tungsten Inert Gas), sia perché si incrementerebbe il costo, sia perché i giunti saldati possono presentare i cosiddetti difetti di saldatura quali incompleta fusione, porosità e centri di innesco per le cricche. Sebbene gli IMV Adapter non siano degli elementi strutturali svolgono un ruolo decisamente delicato, devono essere a tenuta per evitare il disperdersi dell'aria, elemento di vitale importanza all'interno dell'ISS. Inoltre tali elementi devono resistere al lancio per cui saranno comunque soggetti a forze e tensioni elevate.

Un altro aspetto di cui tenere conto è relativo agli spessori delle pareti sia dell'IMV Adapter Internal che External. Le flange infatti presentano uno spessore già abbastanza ridotto, mentre le pareti interne entro le quali fluisce l'aria presentano uno spessore ancora più sottile, ciò causerebbe sicuramente problemi per quanto riguarda lo staffaggio di entrambi i componenti.

Se si considera invece il processo di pressofusione, quindi di iniezione del metallo fuso ad alta pressione all'interno di uno stampo, si deve considerare il grande costo di produzione dello

stampo stesso, che anche in questo caso, per via della geometria particolare dei componenti, prevedrebbe l'uso di importanti sottosquadri. Il costo particolarmente notevole dello stampo verrebbe meno solo nel caso in cui gli adattatori dovessero essere prodotti in serie, perché in tal caso la numerosità della produzione consentirebbe di ammortizzare il costo.

Gli IMV Adapter, come la maggior parte dei componenti aerospaziali, vengono realizzati in pochi esemplari, quindi sicuramente il costo dell'attrezzatura per la pressofusione ricoprirebbe una fetta decisamente ragguardevole del costo di produzione. Si ipotizza che la produzione in pressofusione di poche copie degli IMV Adapter possa arrivare a costare dai 6000 € ai 7000 € ad adattatore.

L'additive manufacturing ha dalla sua parte il grande vantaggio di non impiegare utensili nella costruzione del componente, essendo la stampante l'unico strumento utilizzato. La necessità di non dover costruire uno stampo per la produzione dell'oggetto finale consente inoltre di ridurre il lead time.

Un altro aspetto spesso trascurato è quello relativo alla sostenibilità ambientale che le tecnologie di fabbricazione additiva presentano. In primo luogo l'effettivo utilizzo della polvere, poiché non si impiega più materiale del previsto e l'unico scarto è rappresentato dai supporti. La polvere del letto infatti, dopo l'estrazione del componente realizzato, viene setacciata e riciclata al fine di essere nuovamente impiegata per altri job.

Potenzialmente ogni azienda potrebbe avere in loco le stampanti 3D e quindi effettuare la produzione nell'esatto luogo di utilizzo del componente, eliminando le fasi di trasporto, evitando lo spreco di carburante e le conseguenti emissioni, tutto ciò sempre a vantaggio del lead time.

Conclusioni

In conclusione possiamo ritenerci soddisfatti dei risultati ottenuti mediante il modello di costo, che fornisce delle percentuali di errore accettabili, infatti sia i costi AM che quelli non AM non si discostano molto dai valori indicati nelle quotazioni usate per la validazione. In particolar modo la stima migliore si ottiene confrontando il modello di costo con le quotazioni di produttori che realizzano un singolo componente sulla piattaforma, per quelli invece che saturano la piattaforma si è provveduto a migliorare la stima, ricavando un build time per gli n componenti posizionati nella piattaforma e poi calcolando un costo totale de job, dividendo infine per gli n pezzi realizzati, ottenendo un costo per singolo oggetto che si mostra più aderente ai dati raccolti.

Per quanto riguarda gli IMV Adapter Internal ed External, le loro geometrie e peculiarità sono tali da poter usufruire dei vantaggi della produzione in additive manufacturing. L'applicazione del modello di costo presentato, ci ha permesso di ottenere una prima stima sui tempi e costi della fabbricazione additiva per entrambi i componenti, che risultano sicuramente competitivi in ambito aerospaziale.

| | Build Time | € Finale processo AM |
|-----------------------------|-------------------|-----------------------------|
| IMV Adapter Internal | 12 h | 3804,39 € |
| IMV Adapter EXternal | 9h 46min | 3621,9 € |

Tabella 12: Build time e costo di produzione in AM

Sono dei componenti a spessore sottile, difficilmente ottenibili mediante lavorazioni tradizionali se non modificandone la geometria o con costi eccessivi dovuti alle attrezzature impiegate.

Per applicazioni di nicchia come l'aerospazio dove si ha necessità di produzioni di item complessi e fortemente personalizzati in piccole o medie produzioni, la fabbricazione additiva risulta competitiva e promettente. Con il continuo sviluppo di questa tecnologia sarà possibile ridurre ancora di più i tempi ed i costi di produzione. Sebbene ad oggi l'additive manufacturing non sia una tecnica produttiva in competizione con quelle tradizionali, ma complementare ad esse, non è detto che in futuro potrà sostituire alcuni processi per la produzione in serie o integrarsi maggiormente per il miglioramento dei sistemi ibridi.

Indice delle figure

| | |
|---|----|
| Figura 1: Evoluzione storica AM [2]..... | 10 |
| Figura 2: a) 2000, Selective Laser Melting; b) 1995, Selective Laser Sintering con polveri costituite da due materiali metallici; c) 1990, Selective Laser Sintering, con polveri metalliche e rivestimento polimerico..... | 11 |
| Figura 3: Sistemi AM per la produzione di parti metalliche dal 2000 al 2016 | 12 |
| Figura 4: Andamenti installazioni di sistemi AM fino al 2016 | 12 |
| Figura 5: Sinistra: distribuzione geografica dei sistemi di AM nel 2016; Destra: quote di mercato dei produttori di sistemi di AM nel 2016 | 13 |
| Figura 6: Settori di impiego dell'AM..... | 14 |
| Figura 7: Traditional Manufacturing Vs Additive Manufacturing [3] | 14 |
| Figura 8: Uso dei componenti prodotti in AM [2] | 15 |
| Figura 9: % dei costi in funzione delle fasi di sviluppo e del tipo di prototipo [2] | 16 |
| Figura 10: Cambiamenti del mercato in relazione al numero di varianti, al tempo di vita, alla complessità e ai tempi di consegna. | 17 |
| Figura 11: Percentuale di perdita di utile | 17 |
| Figura 12: Processo di re-design e vantaggi [2]..... | 20 |
| Figura 13: Classificazione tecniche di fabbricazione additiva [2] | 22 |
| Figura 14: Tecniche AM per i metalli..... | 23 |
| Figura 15: Laser Deposition [2]..... | 24 |
| Figura 16: Electron Beam Additive Manufacturing [2]..... | 25 |
| Figura 17: Esempi di componenti prodotti in EBAM [2]..... | 26 |
| Figura 18: Tecniche AM per i polimeri [2] | 27 |
| Figura 19: Prima fase del processo di stereolitografia per generare la green-part | 28 |
| Figura 20: Green-part sulla piattaforma di costruzione | 29 |
| Figura 21: Processo Polyjet/Project [2] | 31 |
| Figura 22: processo Direct Light Projection | 33 |
| Figura 23: Processo Drop on Demand [2] | 35 |
| Figura 24: Componenti costruiti mediante Drop on Demand..... | 36 |
| Figura 25: Processo FDM..... | 37 |
| Figura 26: Processo Selective Laser Sintering [2] | 40 |
| Figura 27: Esempio di Nesting 3D..... | 41 |
| Figura 28: Interazione di una gocciolina di legante con il letto di polvere | 44 |
| Figura 29: Ciclo di lavoro dell'Additive Manufacturing | 46 |
| Figura 30: Modello CAD 3D e modello "shell" nel formato STL | 48 |
| Figura 31: Errore cordale [2] | 48 |
| Figura 32: Tipici errori rilevabili nei file STL [2] | 49 |
| Figura 33: Componente metallico con supporti (sinistra) e senza (destra). | 50 |
| Figura 34: Slicing..... | 50 |
| Figura 35: Effetto scala in funzione del Δs | 51 |
| Figura 36: Slicing costante Vs Slicing adattativo | 51 |

| | |
|--|-----|
| Figura 37: componente cilindrico e 3 diversi orientamenti | 52 |
| Figura 38: Differenza tra il componente di partenza e quello riprogettato..... | 54 |
| Figura 39: Workflow del processo seguito su Inspire [4] | 56 |
| Figura 40: Flusso di lavoro DFAM..... | 59 |
| Figura 41: Processo di produzione delle polveri per AM [5]..... | 62 |
| Figura 42: Processo di water atomization..... | 63 |
| Figura 43: Processo di gas atomizzazione [5]..... | 64 |
| Figura 44: Processo di atomizzazione al plasma [5]..... | 65 |
| Figura 45: Particelle di polvere con infiltrazione di bronzo..... | 67 |
| Figura 46: Processo SLM..... | 68 |
| Figura 47: Micrografie di una sezione prodotta in SLM, a sinistra as built, a destra dopo trattamento termico di distensione [5] | 70 |
| Figura 48: Hatch distance e Point distance | 73 |
| Figura 49: Schematizzazione macchina per EBM | 74 |
| Figura 50: Processo EBM | 75 |
| Figura 51: Componente inglobato nel blocco di polvere alla fine della fase di raffreddamento | 76 |
| Figura 52: Micrografia di una sezione trasversale di un pezzo prodotto in EBM | 78 |
| Figura 53: Come la strategia di scansione influenza la delaminazione tra strati [2]..... | 79 |
| Figura 54: Superficie inclinata [6]..... | 83 |
| Figura 55: Strutture auto-supportanti [6] | 83 |
| Figura 56: Come prevedere i supporti per questo componente..... | 84 |
| Figura 57: Esempio di supporti offsettati..... | 84 |
| Figura 58: Altre soluzioni per minimizzare i supporti..... | 85 |
| Figura 59: Altri accorgimenti per i supporti [6] | 85 |
| Figura 60: Esempio di posizionamento di un componente all'interno del volume di lavoro | 86 |
| Figura 61: Strutture snelle [6] | 87 |
| Figura 62: Sezione sottile parallela al recoater [6]..... | 87 |
| Figura 63: Soluzione ad una sottile sezione parallela al recoater [6]..... | 87 |
| Figura 64: Componenti alleggeriti con ottimizzazione topologica..... | 94 |
| Figura 65: Processo EBAM per la costruzione della cupola di un serbatoio [7]..... | 95 |
| Figura 66: Testa di iniezione. Credit EOS..... | 96 |
| Figura 67: Endoreattore SuperDraco totalmente stampato in 3D. Credit Space X..... | 97 |
| Figura 68: Motore Rutherford della società Rocket Lab. Credit: Rocket Lab..... | 97 |
| Figura 69: Stargate la stampante 3D più grande al mondo. Credit: Relativity Space | 98 |
| Figura 70: Confronto tra diverse tecnologie produttive trazionali e l'Additive Manufacturing [3] | 100 |
| Figura 71: Tensione di snervamento Vs allungamento a rottura per una lega Ti6Al4V processata con differenti tecnologie [5] | 102 |
| Figura 72: Confronto delle caratteristiche meccaniche per AM e tecnologie tradizionali | 103 |
| Figura 73: Rugosità superficiali ottenibili con diverse lavorazioni | 104 |
| Figura 74: Progettazione tradizionale Vs progettazione per AM..... | 104 |
| Figura 75: Deposizione e fresatura in un sistema ibrido..... | 106 |
| Figura 76: Applicazioni dei sistemi ibridi..... | 106 |
| Figura 77: Testa Laser Cladding del progetto AMBIT | 107 |
| Figura 78: Iter seguito per giungere alla validazione del modello di costo..... | 118 |
| Figura 79: Diagramma Environmental Control and Life Support System [25] | 123 |

| | |
|--|-----|
| Figura 80: L'acqua è un drink costoso nello spazio [26] | 124 |
| Figura 81: L'astronauta Frank De Winne che cambia il gruppo di distillazione dell'UPA [27] | 127 |
| Figura 82: Samantha Cristoforetti che si allena sulla ISS [27] | 127 |
| Figura 83: L'astronauta Kjell Lindgren che prepara un caffè [27] | 128 |
| Figura 84: Schema del Temperature and Humidity Control [28] | 130 |
| Figura 85: Schema del circuito di aerazione di Columbus [28] | 130 |
| Figura 86: IMV Internal (sinistra) e IMV External (destra) | 132 |
| Figura 87: Orientamento dell'IMV Internal nel volume di lavoro del SLM 500 e strutture di supporto | 133 |
| Figura 88: Orientamento dell'IMV External nel volume di lavoro del SLM 500 e strutture di supporto | 134 |

Indice delle tabelle

| | |
|---|-----|
| Tabella 1: Dimensione della polvere in funzione della tecnologia AM | 66 |
| Tabella 2: Tipici valori dei parametri di base..... | 73 |
| Tabella 3: Confronto caratteristiche SLM e DED | 90 |
| Tabella 4: Costi AM..... | 112 |
| Tabella 5: Costi non AM | 114 |
| Tabella 6: Parametri dell'IMV Internal | 134 |
| Tabella 7: Parametri dell'IMV External..... | 135 |
| Tabella 8: Costo del materiale per i due IMV | 135 |
| Tabella 9: Costo di stampa per i due IMV | 135 |
| Tabella 10: Costo dell'Additive Manufacturing | 136 |
| Tabella 11: Costo finale degli IMV | 136 |
| Tabella 12: Build time e costo di produzione in AM | 139 |

Bibliografia

- [1] Charles W. Hull, [*Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography*](#), 11 marzo 1986.
- [2] L. Iuliano, *Dispense del corso di Tecniche per la Fabbricazione Additiva*, Torino 2019.
- [3] EPMA, *Introduction to Additive Manufacturing Technology: A guide for Designers and Engineers*, UK 2015.
- [4] SolidThinking Altair, *Inspire 2017 Introduction*.
- [5] P. Fino, *Dispense del corso di Materiali per la Fabbricazione Additiva*, Torino 2019.
- [6] Design guidelines for DMLS: a technical guide. Available <http://www.crucible-design.co.uk/guides/>
- [7] *Make Metal Parts Faster & Cheaper with EBAM® Metal 3D Printing Technology*. Available: <https://www.sciaky.com/additive-manufacturing/electron-beam-additive-manufacturing-technology/>
- [8] *Application Spotlight: 3D-Printed Rockets and the Future of Spacecraft Manufacturing*. Available: <https://amfg.ai/2019/08/28/application-spotlight-3d-printed-rockets-and-the-future-of-spacecraft-manufacturing/>
- [9] *3D-Printed Spacecraft* from Wikipedia, the free encyclopedia. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/3D-printed_spacecraft
- [10] M. Anderson, *Startup Aims to 3D Print Cheaper, Lighter Rockets*, Giugno 2019. Available: <https://spectrum.ieee.org/tech-talk/aerospace/space-flight/relativity-space-scales-up-to-test-its-3dprinted-rockets-next-year>
- [11] Siu L. Chan, Yanglong Lu, Yan Wang*, *Data-driven cost estimation for additive manufacturing in cybermanufacturing*, 8 December 2017.
- [12] Chen CC, Sullivan PA. *Predicting total build-time and the resultant cure depth of the 3D stereolithography process*. Rapid Prototyp J, 1996.
- [13] Pham DT, Wang X. *Prediction and reduction of build times for the selective laser sintering process*. Proc Inst Mech Eng Part B: J Eng Manuf, 2000.
- [14] Campbell I, Combrinck J, de Beer D, Barnard L. *Stereolithography build time estimation based on volumetric calculations*. Rapid Prototyp J, 2008.
- [15] Zhang Y, Bernard A, Valenzuela JM, Karunakaran KP. *Fast adaptive modeling method for build time estimation in Additive Manufacturing*. CIRP J Manuf Sci Technol 2015.
- [16] Zhu Z, Dhokia V, Newman ST. *A new algorithm for build time estimation for fused filament fabrication technologies*. Proc Inst Mech Eng Part B: J Eng Manuf 2016.

- [17] Munguía J, Ciurana J, Riba C. *Neural-network-based model for build-time estimation in selective laser sintering*. Proc Inst Mech Eng Part B: J Eng Manuf 2009.
- [18] Di Angelo L, Di Stefano Paolo. *A neural network-based build time estimator for layer manufactured objects*. Int J Adv Manuf Technol 2011.
- [19] Shehab EM, Abdalla HS. *A design to cost system for innovative product development*. Proc Inst Mech Eng Part B: J Eng Manuf 2002.
- [20] Ruffo M, Chris Tuck, Hague R. *Cost estimation for rapid manufacturing-laser sintering production for low to medium volumes*. Proc Inst Mech Eng Part B: J Eng Manuf 2006.
- [21] Atzeni E, Salmi A. *Economics of additive manufacturing for end-usable metal parts*. Int J Adv Manuf Technol 2012.
- [22] Lan H, Ding Y. *Price quotation methodology for stereolithography parts based on STL model*. Comput Ind Eng 2007.
- [23] Henrique Pereira Mello C, Calandrin Martins R, Rosa Parra B, de Oliveira Pamplona E, Gomes Salgado E, Tavares Seguso R. *Systematic proposal to calculate price of prototypes manufactured through rapid prototyping an FDM 3D printer in a university lab*. Rapid Prototyp J 2010.
- [24] Li Yi*, Christopher Gläßner, Jan C. Aurich, *How to integrate additive manufacturing technologies into manufacturing systems successfully: A perspective from commercial vehicle industry*, Journal of Manufacturing Systems 53, 2019.
- [25] ["International Space Station Environmental Control and Life Support System" \(PDF\)](#). NASA. Retrieved 25 January 2010.
- [26] *La stazione spaziale internazionale*. <https://www.asi.it/wp-content/uploads/2019/07/3-Terzo-Capitolo-LISS - ISS.pdf>
- [27] *Environmental Control and Life Support System (ECLSS)*. NASA. Available: https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/g-281237_eclss_0.pdf
- [28] Parodi P, Bufano G, Palumberi S, Szigetvari Z, Muller R, Witt J. *The Columbus ECLSS First Year of Operations*. SAE International, 2009.

Ringraziamenti

Non sembra vero ma ce l'ho fatta, anche questa volta e nonostante tutto. È stato un anno difficile che ha messo alla prova tutti, ma per un 2020 da dimenticare mi auguro che questo 2021 sia da ricordare, le premesse sono buone.

Domani è Pasqua e per la prima volta la passerò lontano da casa e lontano dai miei affetti, tutte le persone che hanno creduto in me e che mi hanno dato i mezzi per arrivare fin qui oggi. Il primo grazie va sicuramente a loro: la mia famiglia, che mi sopporta e fa il tifo per me da sempre, nonostante il mio carattere a volte difficile ed i miei sbalzi di umore. Un grazie speciale a mia sorella Lina, che con uno scherzo, una sua faccia buffa ed il suo carattere solare mi ha fatto tornare il sorriso nei giorni più tristi. Per lo meno la pandemia di Covid ci ha permesso di tornare bambine e trascorrere insieme un intero anno.

Grazie anche a tutti i nonni, sono fortunata ad avervi ancora con me e spero di donarvi una grande gioia nell'indossare per la seconda volta la corona di alloro.

Impossibile non menzionare gli zii e tutti i miei cugini, vicini e lontani. Mi avete sempre dimostrato il vostro affetto, ma soprattutto incoraggiato per raggiungere questo tanto agognato traguardo. Cuginetti che ancora siete all'Università non demordete, arriverete stanchi alla laurea, ma la soddisfazione che proverete non ha eguali.

Amici, non ha senso nominarvi tutti, anche perché se stai leggendo questi ringraziamenti sai di far parte della cerchia di persone che ritengo tali. Grazie mille a tutti, vi prometto che avremo modo di festeggiare la mia laurea a tempo debito, abbiamo bisogno di una serata spensierata tutti insieme.

Coinquiline preferite, questi anni con voi a Torino resteranno per sempre impressi nella mia memoria, grazie per le nostre pazzie, vi voglio bene.

Un sentito grazie va al mio relatore e professore Alessandro Salmi, per avermi concesso l'opportunità di entrare in contatto con un'azienda come Thales Alenia Space, luogo in cui ho incontrato colleghi meravigliosi, sempre pronti ad insegnarmi qualcosa di nuovo e ad offrirmi i caffè. Un ringraziamento speciale è per l'ing. Massimo Chiampi e la dott.ssa Antonia Simone,

per avermi seguito dal tirocinio fino al completamento della tesi, nonostante le mille difficoltà della distanza ed il poco tempo a disposizione. Mi auguro di rivedervi tutti per un saluto.

Da un paio di mesi ho iniziato il mio primo lavoro presso Alstom ferroviaria, sono molto entusiasta dell'esperienza che sto vivendo, ma soprattutto mi ritengo fortunata nell'aver avuto la possibilità, in così poco tempo, di instaurare dei rapporti umani con i colleghi. Grazie per essere stata scelta, per la continua formazione che mi state donando, per i sorrisi celati dalle mascherine, per il supporto nei momenti più difficili, per l'interesse nei miei confronti.

Ti ho lasciato volutamente per ultimo mio caro Lele, che da più di 10 anni mi sopporti, abbiamo attraversato insieme questi tortuosi anni universitari ed ogni mio traguardo era tuo e viceversa. Ogni mio successo, ottenuto con sforzi e dedizione, è stato per te motivo di orgoglio ed anche questo mi ha spinto a continuare a testa a bassa a lavorare e a non mollare mai. Il Politecnico ci ha allontanato, ma solo fisicamente e sono sicura che se abbiamo superato tutto questo è perché siamo una forza insieme. Ora stai aspettando, un po' impaziente, che io finisca di scrivere questi ringraziamenti, per leggerli e prendermi in giro perché, come al solito, piango dall'emozione. Grazie dalla tua nana preferita.

Ringrazio tanto anche la tua famiglia, che è diventata anche un po' mia, che mi dimostra sempre un affetto sincero e puro.

Cara Alessandra ricorda sempre che quello che è la fine di un percorso, in realtà è solo l'inizio, buona vita.