

POLITECNICO DI TORINO

Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea in Ingegneria della Produzione Industriale e
dell'Innovazione Tecnologica

Tesi di Laurea Magistrale

**Sviluppo e Applicazioni dell'Additive
Manufacturing nell'Industria Aerospaziale: il
Caso Studio di GE Aerospace**



Relatrice:

Prof.ssa Elisabetta Raguseo

Candidato:

Vittorio Degiorgis

Marzo 2024

Table of Contents

| | |
|---|-----------|
| CAPITOLO 1: INTRODUZIONE | 4 |
| CAPITOLO 2: FONDAMENTI DELL'ADDITIVE MANUFACTURING | 5 |
| 2.1 PRINCIPI DI BASE DELL'ADDITIVE MANUFACTURING | 6 |
| 2.2 PROCESSO DI PRODUZIONE TRAMITE STAMPA 3D | 9 |
| 2.3 MATERIALI PER ADDITIVE MANUFACTURING | 14 |
| 2.3.1 TIPI DI MATERIALI | 15 |
| Polimeri | 15 |
| Metalli | 15 |
| Altri Materiali | 17 |
| 2.3.2 PROCESSO DI PRODUZIONE DELLE POLVERI METALLICHE | 17 |
| 2.4 TECNICHE PER ADDITIVE MANUFACTURING | 21 |
| 2.5 VANTAGGI E LIMITI DELL'ADDITIVE MANUFACTURING | 22 |
| CAPITOLO 3: GE AEROSPACE: PROFILO AZIENDALE E CONTESTO INDUSTRIALE | 25 |
| 3.1 PRESENTAZIONE DI GENERAL ELECTRIC | 25 |
| 3.2 RUOLO DELL'ADDITIVE MANUFACTURING IN GE AEROSPACE | 26 |
| 3.2.1 STAMPA 3D DI MOTORI JET PER AEROPLANI | 27 |
| 3.2.2 STAMPA 3D DI PARTI DI AEROPLANI | 28 |
| 3.2.3 STAMPA 3D NELLO SPAZIO | 29 |
| 3.3 PROCESSI DI STAMPA 3D PER METALLI UTILIZZATI DA GE AEROSPACE | 30 |
| 3.3.1 DIRECT METAL LASER MELTING (DLM) | 31 |
| 3.3.2 ELECTRON BEAM MELTING (EBM) | 34 |
| 3.3.3 BINDER JETTING | 37 |
| 3.4 COMPONENTI PRODOTTI CON ADDITIVE MANUFACTURING IN GE AEROSPACE | 39 |
| 3.4.1 CATALYST | 39 |
| 3.4.2 GE9X | 40 |
| CAPITOLO 4: OTTIMIZZAZIONE ATTRAVERSO IL RIUTILIZZO DELLE POLVERI | 43 |
| 4.1 FATTORI CHE INFLUENZANO LA RICICLABILITÀ DELLA POLVERE | 43 |
| 4.1.1 MATERIALE UTILIZZATO E SPECIFICHE DESIDERATE | 44 |
| 4.1.2 PEZZO DA PRODURRE | 45 |
| 4.1.3 MACCHINA E PARAMETRI DI PROCESSO | 45 |
| 4.1.4 FATTORE UMANO | 46 |
| 4.2 STRATEGIE DI RIUTILIZZO DELLE POLVERI | 46 |
| 4.2.1 STRATEGIA A DUE CONTENITORI | 47 |
| 4.2.2 METODO DELLA POLVERE "RINGIOVANITA" | 47 |
| CAPITOLO 5: CONCLUSIONI | 49 |
| BIBLIOGRAFIA | 51 |

Capitolo 1: Introduzione

L'Additive Manufacturing è una tecnologia di produzione relativamente nuova con un occhio rivolto al futuro, ma attualmente adatta solo a settori specifici che possono sfruttarne appieno il potenziale.

Questa tecnologia risulta conveniente per la produzione di componenti personalizzati, di alta qualità e di valore aggiunto, ed è utilizzata prevalentemente nei settori aerospaziale, biomedico, dentale ed automobilistico.

Poiché il lancio di un chilogrammo in orbita può costare fino a 40.000 €, l'ottimizzazione topologica offerta dall'Additive Manufacturing è un prezioso strumento per affrontare questa sfida. Inoltre, i componenti aerospaziali spesso non sono prodotti in serie, il che significa che stampare i componenti su richiesta può portare a notevoli risparmi in termini di attrezzature e tempi di sviluppo.

Il seguente lavoro di tesi si propone di esplorare le applicazioni dell'Additive Manufacturing nell'Industria Aerospaziale, con particolare attenzione alle esperienze e alle sfide affrontate dall'azienda GE Aerospace. Saranno valutati i vantaggi, le prestazioni e gli sviluppi futuri dell'Additive Manufacturing per l'industria di riferimento, con l'obiettivo di contribuire alla conoscenza e alla comprensione di questa tecnologia rivoluzionaria nel contesto specifico di General Electric.

Per quanto concerne la struttura della tesi, dopo un'introduzione del contesto generale della ricerca, in cui verrà fornita una panoramica sull'Additive Manufacturing nell'Industria Aerospaziale, verranno esaminati i principi di base di questa tecnologia, compresi i processi di stampa 3D e i materiali impiegati. Verranno discussi anche i vantaggi e le sfide dell'AM nell'Industria Aerospaziale.

Successivamente verrà presentato il profilo dell'azienda GE Aerospace e il contesto industriale in cui opera. Verranno analizzate le applicazioni specifiche dell'Additive Manufacturing nell'azienda ed esaminate le tecnologie sviluppate ed i componenti prodotti da esse.

Infine, si esaminerà l'importanza dell'impiego di tecniche di riciclo dei materiali per conseguire un contesto economicamente vantaggioso per la produzione mediante questa tecnologia.

Capitolo 2: Fondamenti dell'Additive Manufacturing

Per consentire l'operatività di velivoli aerei e spaziali è imprescindibile rispettare rigorosi parametri di sicurezza, prestazioni e affidabilità. Negli ultimi decenni l'Additive Manufacturing, grazie alle significative innovazioni che ha attraversato, ha conquistato un posto di rilievo nella produzione effettiva di componenti aerospaziali, con l'obiettivo di creare parti avanzate e di altissima precisione.

General Electric, conosciuta anche come GE, è uno degli attori principali nell'utilizzo e nello sviluppo di questa tecnologia, come evidenziato nel grafico di seguito. Nel 2021, l'azienda si classifica al secondo posto per numero di famiglie di brevetti, totalizzandone 1214.

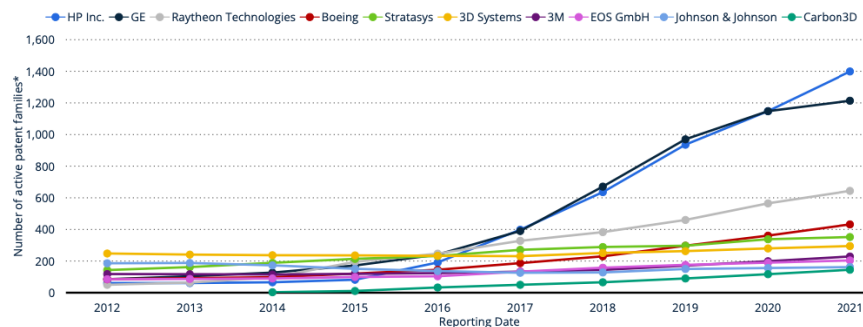


Figura 1.1: Maggiori titolari di brevetti nella produzione additiva a livello mondiale dal 2012 a novembre 2021, per numero di famiglie di brevetti attivi. [1]

Ciò che la distingue è la sua capacità di applicare l'Additive Manufacturing in una vasta gamma di settori, che vanno dall'energetico all'aerospaziale. Questo successo è stato reso possibile anche attraverso la creazione di una nuova divisione, GE Additive, dedicata al R&D e al fine di fornire supporto alle altre aree aziendali. Inoltre, General Electric ha stabilito partnership e joint venture con aziende di tutto il mondo per avanzare in progetti che sfruttano le nuove tecnologie. Un esempio lampante è Avio Aero, un'azienda aerospaziale del torinese che ha integrato con successo la fabbricazione additiva nei propri programmi esistenti e ha avviato nuove iniziative per esplorare i confini del settore.

L'industria aerospaziale ha abbracciato l'Additive Manufacturing per diverse applicazioni, tra cui la prototipazione rapida, la produzione di

componenti strutturali e di parti interne di aeromobili. La flessibilità offerta dall'Additive Manufacturing consente di ridurre il peso dei componenti, migliorare le prestazioni complessive degli aeromobili e accelerare i tempi di produzione.

Tuttavia, l'integrazione dell'Additive Manufacturing nell'industria aerospaziale presenta anche sfide significative. La qualità, l'affidabilità e la certificazione dei componenti prodotti mediante Additive Manufacturing sono questioni cruciali da affrontare per garantire la sicurezza e l'integrità strutturale degli aeromobili. Inoltre, la selezione dei materiali adeguati e l'ottimizzazione dei processi di produzione sono fattori critici da considerare per raggiungere le specifiche richieste.

2.1 Principi di Base dell'Additive Manufacturing

L'Additive Manufacturing, noto anche come AM o stampa 3D, è una metodologia di produzione innovativa che consente la creazione di parti tridimensionali mediante l'aggiunta di strati di materiale, con un procedimento che ricorda la stampa 2D su foglio, ma ripetuto tante volte quanti sono gli strati del componente. Il principio di base consta nel posizionare la materia prima, sia essa allo stato solido, fuso o in polvere, per poi saldarla allo strato sottostante mediante fusione, sinterizzazione o polimerizzazione, senza bisogno di ulteriori utensili.

La stampa 3D rende possibile la produzione di geometrie complesse, e risulta conveniente in situazioni in cui viene richiesto che il componente sia prodotto in piccoli lotti o necessiti di elevata personalizzazione. In figura 2.1, vengono mostrati i casi in cui adottare una particolare tecnologia AM, il Laser Beam Melting, al posto di tecnologie tradizionali risulta economicamente più vantaggioso.

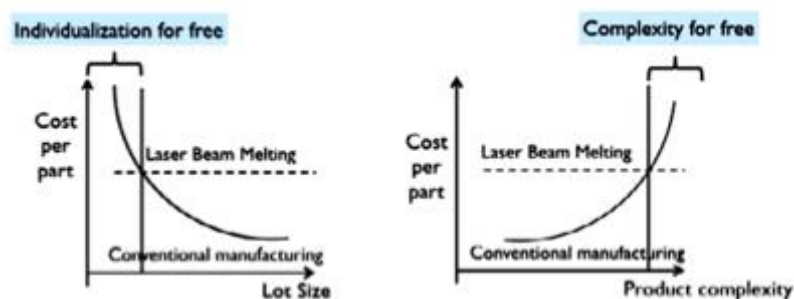


Figura 2.1: Fabbricazione tradizionale e additiva a confronto

A sinistra si evidenzia come l'AM consenta di ottenere un costo per pezzo inferiore rispetto alle tecniche di produzione tradizionali per dimensioni di lotti ridotte. Si parla in questo caso di “individualization for free”. Secondo lo stesso principio, man mano che la complessità del componente aumenta, si osserva un incremento dei costi nel caso della produzione convenzionale, mentre per il Laser Beam Melting i costi rimangono sostanzialmente stabili. Di conseguenza, è possibile identificare il punto critico in cui diventa economicamente conveniente adottare le tecniche Additive, il cosiddetto “complexity for free”.

Le prime idee riconducibili alla fabbricazione additiva che conosciamo oggi risalgono agli anni '80, quando l'ingegnere Charles W. Hull pubblicò un brevetto intitolato "Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography", che sanciva l'invenzione della tecnologia nota come Stereolitografia o SLA. [2]

Questa tecnologia inizia ad essere utilizzata per la fase di prototipazione dei componenti quando la 3D Systems, azienda leader nel settore dello stampaggio 3D fondata da Hull, inventa il formato in cui deve essere convertito il file CAD per essere mandato in stampa, il file STL.

A quel tempo i pezzi prodotti mediante stampa 3D non possedevano ancora le proprietà meccaniche necessarie per essere utilizzati come prodotti finali, ma si prestavano notevolmente bene per la creazione fisica di prototipi funzionali, concettuali e tecnici, consentendo di ottenere risultati in tempi relativamente brevi senza la necessità di progettare e realizzare attrezzi specifici per la produzione del prototipo poiché era sufficiente avere il file CAD.

Nel corso degli anni questa metodologia di fabbricazione prende piede e si evolve, nascono diverse tecniche di produzione e si sviluppano altre applicazioni, come il Rapid Casting (RC) e il Rapid Tooling (RT), che utilizzano la tecnologia additiva per produrre rispettivamente anime per fonderia e inserti per stampi.

Il punto di svolta avviene quando questa tecnologia inizia ad essere impiegata per la produzione di componenti finali, attorno al 2000, grazie all'evoluzione delle tecniche stesse, con fonti energetiche più potenti, come ad esempio fasci di elettroni, oltre ad uno sviluppo nei materiali, non più esclusivamente polimerici o ceramici, ma anche metallici.

Attualmente, esiste una vasta gamma di tecniche disponibili, in particolare quelle legate ai materiali polimerici, oltre ad un notevole incremento nelle

opzioni relative ai materiali metallici per la produzione di componenti finali.

Si stima infatti, come mostrato in figura 2.2, che tra il 2023 ed il 2025 il mercato globale legato alla fabbricazione additiva crescerà del 23.7% annualmente e che invece la crescita del mercato nel biennio 2025-2026 sarà del 20.4%. Entro il 2030 le tecnologie AM consentiranno di produrre prodotti finiti su larga scala e, sebbene il mercato dei materiali per la stampa 3D sia attualmente dominato dalle materie plastiche, i materiali metallici sono destinati a sostituirli nella maggior parte delle applicazioni.

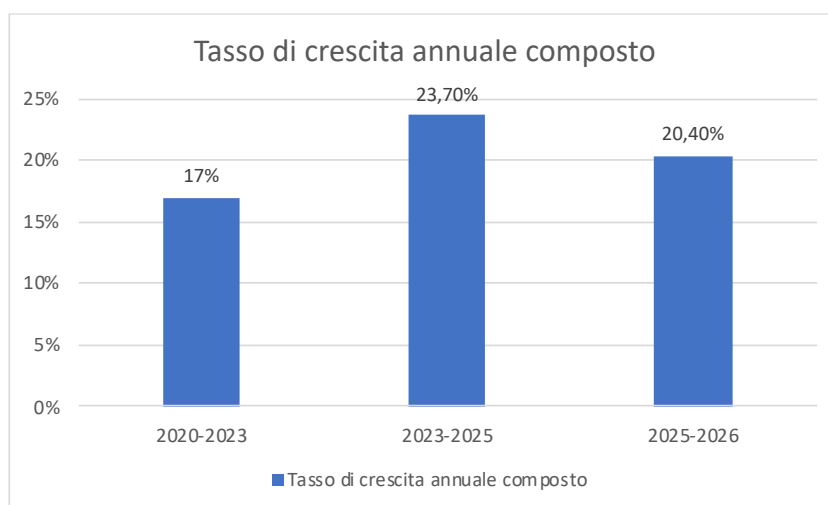


Figura 2.2: Tasso di crescita del mercato dell'Additive Manufacturing dal 2020 al 2026 [1]

Per quanto riguarda le attuali aree di applicazione, risulta evidente che la stampa 3D trovi un impiego predominante nei settori industriali, aerospaziali e automobilistici, che insieme rappresentano il 58% circa del totale, come mostrato in figura 2.3. Tuttavia, i campi di utilizzo si estendono anche ad altri settori, come quello medico/dentale, specialmente per la realizzazione di protesi personalizzate e alla produzione di componenti elettronici, senza tralasciare l'ambito della ricerca accademica e militare.



Figura 2.3: Distribuzione degli investimenti in stampa 3D a livello globale nel 2019, per applicazione [1]

2.2 Processo di Produzione tramite Stampa 3D

Sebbene il processo di stampaggio 3D vari tra le diverse tecnologie di produzione additiva, le fasi del ciclo di lavoro, mostrato in figura 2.4, sono comuni a tutte le tipologie di AM.

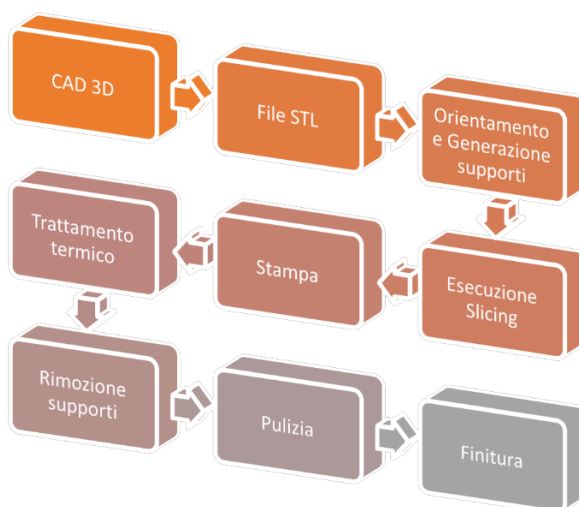


Figura 2.4: Fasi della produzione di un componente tramite AM

Si inizia con la creazione del modello CAD 3D utilizzando un software di progettazione. Successivamente, si procede con la conversione del modello nel formato STL, il file standard utilizzato nella fabbricazione additiva.

Una volta completata la fase di preparazione del file, si procede all'orientamento del componente all'interno dello spazio di lavoro della macchina. Se necessari, si generano i supporti e si esegue lo slicing.

Successivamente, si avvia la produzione del componente, che avviene strato per strato. Se il materiale utilizzato è metallico, si può procedere con un trattamento termico appropriato. Infine, si rimuovono i supporti, e si eseguono le operazioni di pulizia e rifinitura superficiale per ottenere un prodotto finito di qualità.

Approfondiamo ora le diverse fasi coinvolte nel processo di produzione, le sfide che possono emergere e le decisioni che devono essere prese per garantire il corretto completamento del lavoro.

Il file STL, concepito da Chuck Hall, fondatore di 3D Systems e della tecnologia STL, rappresenta una approssimazione di un modello CAD solido in una struttura di tipo "shell", in cui la superficie esterna viene suddivisa in triangoli di varie grandezze. Questo metodo consente di ricostruire il modello originale nel modo più accurato possibile. La qualità della riproduzione migliora all'aumentare del numero di triangoli che approssimano la superficie, ma è importante trovare un equilibrio poiché un eccesso di triangoli può generare file pesanti senza apportare ulteriori benefici.

Nel file STL, ogni triangolo è descritto da tre punti che indicano la posizione dei vertici e dalla normale alla superficie. Queste informazioni definiscono la geometria del triangolo e contribuiscono alla rappresentazione del modello tridimensionale.

La ragione principale di questa conversione è ottenere uno standard riconosciuto universalmente da tutte le macchine. Inoltre, le macchine stesse sono in grado di gestire più facilmente questo tipo di file. Sebbene l'uso di questo formato sia attualmente il più attendibile e comune nell'ambito dell'Additive Manufacturing, presenta alcune problematiche legate all'approssimazione del modello CAD. Una delle tipologie di errore che può verificarsi è rappresentata dall'errore cordale ϵ_c , come illustrato nella Figura 2.5.

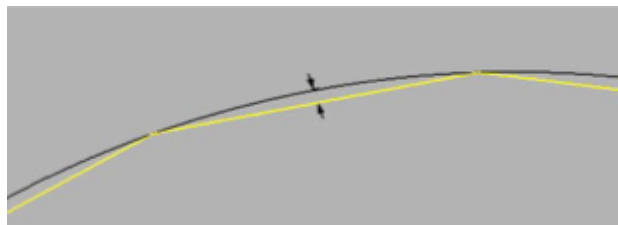


Figura 2.5: Rappresentazione dell'errore cordale

L'errore cordale rappresenta sostanzialmente la distanza tra la traccia del modello STL, che consiste in una serie di segmenti, e la traccia continua del modello CAD 3D. Questo errore cordale si traduce in un effetto di "facetting" o "sfaccettatura". Durante la conversione dal CAD, è possibile controllare e impostare l'errore cordale desiderato, con un valore tipico di 0,01 mm.

Oltre all'errore cordale, ci sono altre tipologie di errori che possono verificarsi, come spazi vuoti tra le celle, normali invertite o intersezioni tra i triangoli, come mostrato nella Figura 2.6. Fortunatamente, sono stati sviluppati diversi software correttivi in grado di gestire la maggior parte di questi errori, offrendo soluzioni efficaci.

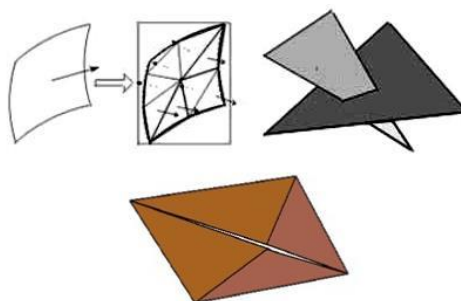


Figura 2.6: Altri tipi di errori legati alla conversione del formato CAD al formato STL

Sebbene questi software svolgano la loro funzione in modo accurato, è importante che il modello CAD iniziale sia creato in modo ottimale, evitando anche piccoli errori iniziali che potrebbero compromettere l'intero processo di stampa.

Allo stesso tempo, altri passaggi cruciali, come l'orientamento del componente nella macchina, la generazione dei supporti e la creazione dello slicing, devono essere affrontati in modo sinergico. L'orientamento del componente all'interno del volume di lavoro influisce sulla quantità e sulla disposizione dei supporti, nonché sulla tipologia di slicing adottata.

I supporti ancorano il componente alla piattaforma di lavoro, sostengono le parti sporgenti ed infine proteggono le parti laterali da azioni che potrebbero comprometterne la costruzione.

A seconda delle diverse tecniche di fabbricazione additiva e dei materiali utilizzati per costruire il componente, i supporti possono avere anche altri compiti più specifici, che devono essere considerati ad hoc. Ad esempio, nelle tecniche che impiegano letto di polvere per i materiali metallici, i

supporti svolgono un ruolo cruciale nello smaltimento del calore su tutto il componente, contribuendo a migliorare le tensioni interne e le distorsioni causate dal forte calore coinvolto nel processo.

Sebbene la presenza di supporti sia indispensabile alla corretta produzione di un componente, è importante considerare che rappresentano materiale di scarto che deve essere creato fisicamente durante la fase di stampa e successivamente rimosso. Pertanto, è fondamentale orientare il componente in modo corretto al fine di ridurre al minimo la quantità di supporti necessari e limitare i tempi e i costi sia della stampa che delle fasi di post-processing.

Il processo di slicing consiste nella suddivisione del componente in sezioni di spessore pari a Δs . Queste sezioni saranno gli strati fisicamente prodotti utilizzando la stampante 3D. Nella Figura 2.7 viene mostrato un esempio di slicing. I piani, paralleli tra loro, sono perpendicolari alla direzione di costruzione del componente.

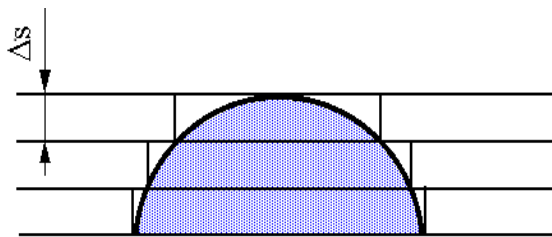


Figura 2.7: Slicing di un componente

Lo spessore degli strati dipende dalle specifiche della macchina utilizzata e mantenere valori di Δs più bassi possibile si traduce in una migliore qualità superficiale del componente stampato. Legato al processo di slicing è associato un errore, noto come "staircase effect", in cui la superficie del componente presenta una texture a gradini, che tuttavia può essere facilmente corretto attraverso un successivo trattamento di carteggiatura.

Nella Figura 2.8 è possibile osservare come l'effetto scala sulla superficie sia maggiormente visibile quando si utilizzano valori più grandi di Δs , come nel caso a sinistra. Al contrario, nella figura a destra in cui Δs è notevolmente più piccolo, l'effetto scala risulta meno evidente. A valle di questa considerazione, sebbene si possa prediligere un Δs minore in quanto meglio approssimato, è fondamentale trovare un equilibrio adeguato poiché una riduzione eccessiva dello spessore dello strato comporta un aumento del tempo di stampa e delle dimensioni del file STL.

Per i materiali polimerici, i valori tipici di Δs variano tra 0.05 e 0.3 mm, a seconda della rugosità richiesta. Nel caso dei metalli, invece, il range si colloca tra 0.02 e 0.05 mm a causa di problematiche legate al restringimento degli strati in fase di raffreddamento.

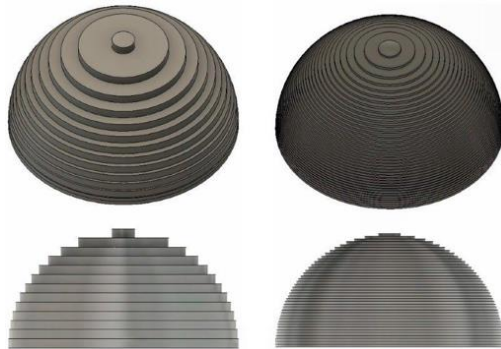


Figura 2.8: Staircase effect in base allo spessore degli strati

Se le circostanze lo richiedono, si può adottare la tecnica di slicing adattativo, in cui lo spessore dello strato non è costante per tutte le sezioni, ma viene ridotto solo dove necessario. L'utilizzo di Δs variabile consente di ottenere una migliore approssimazione superficiale. Per le tecniche AM ad estrusione questo approccio non è sempre possibile poiché lo spessore dello strato dipende dal diametro fisso dell'ugello.

L'orientazione del pezzo, come anticipato, ha un impatto sul numero di supporti necessari, nonché sulla eventualità che si manifesti l'effetto scala. Nella Figura 2.9, sono illustrati tre diversi orientamenti di un componente cilindrico, evidenziando come l'orientamento scelto possa influire sull'aspetto finale del prodotto.

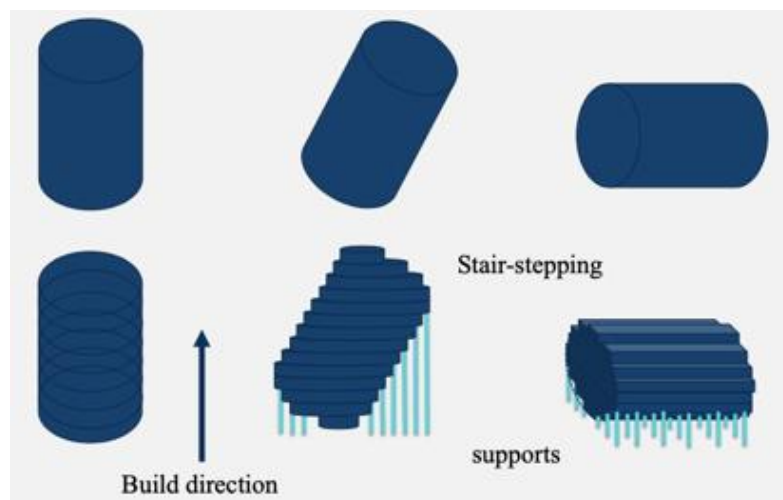


Figura 2.9: Numero di supporto relativa alla diversa orientazione di un componente

A parità di spessore dello strato, l'orientamento del componente produce risultati differenti tra loro, come segue:

Cilindro in posizione verticale: in questa configurazione, non è necessaria una quantità significativa di supporti, a meno che il componente sia realizzato in un materiale metallico e richieda una dissipazione del calore. In questo caso, l'effetto scala sarà ridotto al minimo possibile. Tuttavia, se l'altezza del componente è considerevole, il tempo di stampa aumenterà.

Cilindro in posizione orizzontale: in questa posizione, sarà necessario utilizzare numerosi supporti e l'effetto scala sarà più evidente rispetto agli altri due casi. Il tempo di stampa invece sarà il più breve possibile.

Cilindro inclinato: è consigliabile minimizzare il numero di supporti prediligendo un angolo di inclinazione corretto. In questo caso, l'effetto scala sarà presente, ma meno marcato rispetto alla posizione orizzontale. Il tempo di stampa sarà intermedio.

Dopo lo stampaggio, che è completamente gestito dalla macchina, è possibile eseguire un trattamento termico, specialmente se il componente è realizzato in materiale metallico o il processo lo richiede. Di solito, questo trattamento è considerato necessario dopo l'utilizzo della tecnica di fusione selettiva a laser (SLM) per componenti che richiedono resistenza ad alte temperature ed al fenomeno di creep. In questi casi, è possibile effettuare un primo trattamento termico del pezzo quando è ancora fissato alla base e provvisto di supporti, al fine di rilasciare le tensioni residue. Successivamente, può essere eseguito un secondo trattamento termico per ingrandire il grano cristallino e ottenere le proprietà meccaniche desiderate.

I supporti possono essere rimossi manualmente o mediante elettroerosione a filo, a seconda della rigidità e della complessità del componente. In determinate circostanze, i supporti sono solubili in specifiche soluzioni. Successivamente, si procede con l'ultima fase, la finitura superficiale, per rimuovere eventuali segni lasciati dai supporti e soddisfare i requisiti di rugosità superficiale per il pezzo. La finitura può includere processi come verniciatura, placcatura, metallizzazione, lucidatura e sabbiatura. [3]

2.3 Materiali per Additive Manufacturing

2.3.1 Tipi di Materiali

Polimeri

Il vasto gruppo dei polimeri abbraccia una diversificata gamma di materiali, ognuno con proprietà uniche e adatto a varie industrie. Tra queste proprietà rientrano la trasparenza, il colore, la resistenza alla trazione, la temperatura di transizione vetrosa, la biocompatibilità e altre ancora.

Nel contesto della stampa 3D, i materiali polimerici per l'uso quotidiano si presentano principalmente sotto forma di filamenti, resine e polveri. Questi polimeri possono essere suddivisi principalmente in due categorie principali: termoplastici e termoindurenti. La principale differenza tra queste categorie risiede nel loro comportamento quando esposti al calore.

I materiali termoplastici possono essere fusi e ri-solidificati ripetutamente senza che le loro proprietà subiscano cambiamenti significativi. Questi materiali trovano impiego nella stampa 3D a filamento fuso e anche nella produzione tradizionale, dove il processo di fabbricazione coinvolge la fusione, l'estrusione o l'iniezione del materiale, seguiti da raffreddamento e solidificazione.

D'altra parte, i polimeri termoindurenti non si fondono ma diventano solidi attraverso catalizzatori come calore o luce. Questi polimeri, spesso presenti in forma di resine vischiose, induriscono senza possibilità di ritorno dopo essere stati attivati e se esposti ad alte temperature perdono le loro caratteristiche intrinseche. Alcune tecnologie di stampa 3D, come Stereolitografia (SLA), Stampa 3D a luce digitale (DLP) e Stampa a getto di materiale (Material Jetting), utilizzano polimeri termoindurenti, che si solidificano grazie a luce laser o ultravioletta.

Dal punto di vista economico, i polimeri utilizzati nella stampa 3D risultano notevolmente più costosi rispetto agli stessi materiali utilizzati nei processi tradizionali. Per fare un confronto, il prezzo della materia prima per un chilogrammo di prodotto può aumentare dalle 55 alle 125 volte quando destinato alla stampa 3D, a causa delle specifiche proprietà richieste per l'utilizzo nei processi di stampa 3D. [4]

Metalli

I materiali metallici utilizzati nei processi di stampa 3D stanno vivendo un costante aumento di diversificazione e applicazione. Questa varietà va dall'acciaio inossidabile alle leghe di alluminio e titanio, sino ai metalli

preziosi come l'oro e l'argento, oltre ad altre opzioni. Nonostante ciò, i metalli non hanno ancora raggiunto i livelli di prevalenza e versatilità riscontrati nei polimeri.

La capacità di produrre componenti con una percentuale di materiale metallico che si avvicina al 100% - eliminando quindi contaminazioni - consente la creazione di parti dotate di eccezionali caratteristiche. Questo è possibile grazie a tempi di solidificazione ridotti rispetto alle tecniche tradizionali, il che favorisce la formazione di grani di dimensioni minori e con una distribuzione più uniforme. Tali caratteristiche si riflettono in componenti con proprietà meccaniche superiori, particolarmente adatte a settori esigenti come l'industria aerospaziale. [4]

I materiali metallici vengono principalmente utilizzati sotto forma di polveri sottili. Nell'AM per metalli, le particelle devono possedere specifiche dimensioni, forme e caratteristiche di attrito per garantire l'alta qualità del pezzo finale. Questo aspetto verrà approfondito nel capitolo dedicato alle tecnologie impiegate da GE.

Va sottolineato che i costi dei materiali metallici, analogamente a quelli polimerici, risultano superiori rispetto a quelli utilizzati nei processi produttivi tradizionali. Un'analisi condotta dalla professoressa e ricercatrice del Politecnico di Torino, Eleonora Atzeni, ha rilevato che il costo del materiale per produrre un componente in leghe di alluminio mediante metodi tradizionali è di circa 2,60€/kg, mentre l'utilizzo della stampa 3D comporta un costo del materiale in polvere di 25,80€/kg. [5]

Considerando questi dati, potrebbe sorgere la domanda: se i materiali di base sono così costosi, qual è la convenienza nell'adottare questa tecnologia? La risposta risiede nella natura dei costi associati. Mentre il costo dei materiali può sembrare elevato, è importante comprendere che tale costo rappresenta una voce fissa, a differenza di quelli che coinvolgono l'intero processo produttivo.

È fondamentale considerare diversi aspetti. Innanzitutto, il vantaggio della stampa 3D risiede nel notevole risparmio di tempo di produzione rispetto ai metodi convenzionali. La tecnologia di stampa 3D consente di ridurre significativamente il tempo richiesto per la solidificazione dei componenti, il che si traduce in grani più piccoli e una distribuzione omogenea, contribuendo a migliorare le proprietà meccaniche dei componenti stessi.

In aggiunta, va presa in considerazione la capacità di produrre diversi componenti, o parti diverse di un unico componente, in un singolo ciclo di stampa. Questo aspetto è particolarmente significativo, in quanto nei processi tradizionali le parti spesso devono essere prodotte separatamente e poi assemblate tramite viti o saldature. La stampa 3D, al contrario, consente di produrre il componente completo in un solo passaggio, partendo dai dati del modello CAD. Ciò non solo riduce i tempi di produzione, ma elimina anche la necessità di assemblaggio e aumenta la qualità del pezzo.

È importante inoltre considerare che nei processi tradizionali, il lead time - ovvero il tempo necessario dal momento dell'ordine alla consegna del prodotto finito - è spesso misurato in settimane. Inoltre, il tempo effettivo di produzione costituisce solo una parte minoritaria di questo periodo, poiché sono presenti attese legate ai passaggi tra diverse fasi produttive. La stampa 3D, al contrario, richiede solo i dati del modello CAD e il processo produttivo avviene in un singolo passaggio, a seconda delle dimensioni del componente richiesto. [6]

Altri Materiali

Per concludere, è importante menzionare anche l'impiego di materiali compositi che combinano una base con l'aggiunta di un secondo materiale. Tra questi, il nylon è uno dei più diffusi e può essere arricchito con vetro, alluminio o fibre di carbonio al fine di migliorarne le proprietà.

Inoltre, la produzione di componenti ibridi metallici è possibile attraverso l'uso di una base in materiali come alluminio o rame, cui vengono aggiunti altri materiali. Questo approccio consente di combinare le qualità intrinseche dei diversi materiali, risultando in componenti con proprietà uniche e adattabili alle esigenze specifiche.

Infine, l'utilizzo di ceramiche o filamenti contenenti polveri di ceramica o sabbia si rivela particolarmente vantaggioso per soddisfare le richieste di settori di nicchia. Questi materiali offrono proprietà termiche, chimiche o di resistenza specifiche che li rendono ideali per applicazioni specializzate. [7]

2.3.2 Processo di Produzione delle Polveri Metalliche

Perché una polvere metallica possa essere impiegata con successo in un processo di stampa 3D, è essenziale che presenti attributi accuratamente definiti. Queste proprietà sono fondamentali per prevenire la comparsa di difetti nel componente finale e per evitare potenziali danni alla macchina utilizzata. Le particelle di polvere devono possedere una forma il più possibile sferica e una dimensione dei grani attentamente regolata.

Inoltre, va sottolineato che la fase di produzione è intrinsecamente costosa. Questo è dovuto al fatto che è richiesta l'adozione di un processo particolare, ancora relativamente giovane nell'ambito tecnologico. In aggiunta, è necessario impiegare personale altamente qualificato per garantire la corretta esecuzione di questa fase.

Un aspetto interessante riguardante la struttura delle polveri è che, per i processi di stampa 3D, risulta preferibile che i singoli granuli non siano omogenei in termini di dimensioni. Piuttosto, è auspicabile che vi siano particelle di dimensioni più piccole che si collocano negli spazi vuoti, al fine di ottimizzare l'occupazione del volume all'interno del pezzo da fabbricare. Questo approccio mira a prevenire la formazione di difetti interni. Va inoltre sottolineato che la sfericità delle particelle gioca un ruolo significativo nel fenomeno conosciuto come "flowability", ovvero la capacità delle particelle di scorrere agevolmente le une sulle altre, aspetto che contribuisce a evitare ostacoli e danneggiamenti durante la fase di distribuzione della polvere attraverso la racla.

Come già accennato, il costo dei materiali utilizzati nella Manifattura Additiva è notevolmente elevato. 1 kg di polvere di una lega al titanio, ad esempio, potrebbe costare fino a 25 volte di più rispetto alla stessa quantità di materiale in forma di lingotto. Questa disparità è attribuibile al tipo di processo richiesto per la produzione e al valore aggiunto che deriva dalle rigorose qualità da ottenere.

La produzione di materiale in forma di polvere parte da un lingotto del metallo puro o della lega richiesta, che viene successivamente fuso e trasformato in polvere attraverso varie tecniche. Spesso sono necessari passaggi di post-processamento e convalida della polvere.

Tra i principali metodi utilizzati per trasformare il materiale in polvere troviamo:

1. Atomizzazione mediante acqua
2. Atomizzazione centrifuga o a gas

3. Atomizzazione al plasma

Per la produzione su vasta scala, i primi due approcci sono i più diffusi per ragioni di convenienza economica, sebbene non siano adatti a metalli suscettibili ad ossidazione frequente.

In particolare, l'atomizzazione con l'uso dell'acqua, illustrata nella figura 2.10, risulta meno indicata per la creazione di polveri destinate alla fabbricazione additiva, ma trova ampio impiego nella produzione della maggior parte delle materie prime utilizzate nella metallurgia delle polveri.

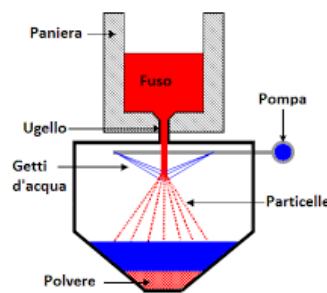


Figura 2.10: Processo atomizzazione ad acqua

Il motivo per cui le polveri prodotte tramite l'atomizzazione ad acqua non sono adatte per la stampa 3D, oltre che per la loro forma non regolare data dal processo di raffreddamento non sufficientemente prolungato da consentire alle goccioline di assumere una forma sferica, anche per l'interazione dell'acqua con molti metalli, che potrebbe causare alterazioni chimiche sulla superficie delle particelle.

Attraverso questo processo è possibile ottenere polveri estremamente fini, con diametri che arrivano fino a circa 2-3 μm . Tuttavia, dimensioni così piccole non sarebbero adatte alla stampa 3D a causa delle forze elettrostatiche superficiali che provocherebbero l'aggregazione delle particelle.

Nel processo di produzione di polveri per la Manifattura Additiva, il metodo più prevalente è l'atomizzazione a gas, il quale supera le limitazioni riscontrate nell'utilizzo dell'acqua, come la rapida solidificazione e le reazioni chimiche indesiderate. La configurazione, in larga misura simile a quella dell'atomizzazione con acqua, è rappresentata nella figura 2.11 e include un forno nella parte superiore, un sistema di atomizzazione e un sistema di raffreddamento. Quest'ultimo, evitando l'impiego di acqua, consente di ottenere particelle sferiche grazie a una

solidificazione più lenta. Per di più, questo metodo permette di produrre polveri a partire da una più ampia gamma di metalli, che altrimenti reagirebbero negativamente con l'acqua.

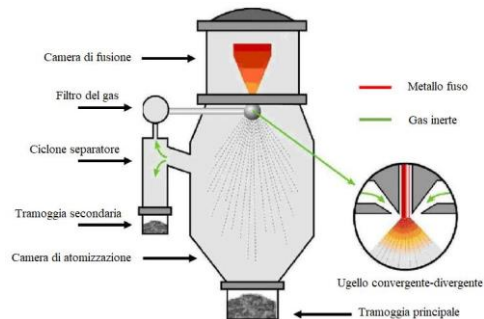


Figura 2.11: Processo di atomizzazione a gas

Per quanto riguarda l'atomizzazione al plasma, l'energia utilizzata proviene da ioni ad alta temperatura diretti verso il metallo da fondere. A differenza dei due metodi precedenti, questa tecnica non si basa su lingotti o pezzi di metallo, ma su filamenti. È importante notare che alcuni metalli con ridotta duttilità non sono adatti a questo processo.

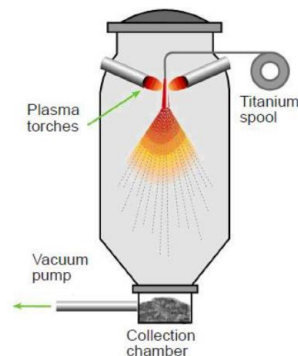


Figura 2.12: Processo di atomizzazione al plasma

Questo procedimento offre la capacità di generare polveri altamente sferiche, poiché è possibile controllare efficacemente la velocità di raffreddamento.

In generale, dopo l'atomizzazione segue una fase di controllo in cui le particelle vengono suddivise in base alle loro dimensioni attraverso setacci a vibrazione meccanica. Questo passaggio riveste una notevole importanza poiché, per le tecniche di fabbricazione additiva, ciascuna tecnologia richiede un intervallo di dimensioni specifico affinché si possano ottenere prodotti con proprietà ottimali. Ad esempio, per le tecniche di stampa a letto di polvere mediante laser, le dimensioni delle particelle devono essere notevolmente più piccole, comprese tra 15 e 45

μm , rispetto alle polveri utilizzate nella fusione tramite fascio elettronico, le quali hanno dimensioni da 45 a 100 μm . Questa diversificazione è essenziale poiché la fonte di energia come il laser è più debole del fascio di elettroni e potrebbe non riuscire a fondere adeguatamente particelle di dimensioni maggiori.

2.4 Tecniche per Additive Manufacturing

Dalla sua introduzione negli anni '80, la stampa 3D ha notevolmente ampliato le sue possibilità sia in termini di tecniche di fabbricazione che di gamma di materiali impiegabili. Questi sviluppi hanno portato la tecnologia oltre la sua semplice funzione di prototipazione rapida, consentendo la realizzazione di utensili, stampi e persino componenti finali. Oggi, una vasta gamma di tecnologie viene impiegata, e di seguito saranno spiegate le principali, seguendo la classificazione definita nello standard ISO/ASTM 52900, che suddivide i processi in:

Stampa 3D a estrusione: Questo processo coinvolge l'estrusione di materiale fuso attraverso un ugello, il quale deposita il materiale strato su strato per costruire l'oggetto desiderato. È un metodo versatile che trova impiego in diverse applicazioni.

Stampa 3D a resina: Questa tecnica, spesso nota come Stereolitografia (SLA) o Stampa 3D a luce digitale (DLP), utilizza resine fotosensibili che vengono indurite strato per strato grazie all'esposizione a una luce UV. È ampiamente utilizzata per oggetti dettagliati e di precisione.

Stampa 3D a fusione di polveri: Questo processo prevede la fusione di strati di polvere tramite l'uso di un raggio laser o un fascio elettronico, fondendo i punti desiderati per creare l'oggetto. È adatto per la produzione di parti metalliche e ceramiche.

Stampa 3D a getto di materiale: Qui, il materiale viene depositato attraverso un ugello simile a quello di una stampante a getto d'inchiostro, stratificando il materiale per creare l'oggetto. È comunemente usato per materiali termoplastici.

Stampa 3D a getto di legante: Questa tecnica coinvolge la stratificazione di polvere di materiale con l'applicazione selettiva di un legante. Gli strati vengono induriti e sovrapposti per creare l'oggetto finale.

Stampa 3D a energia diretta: Questo processo, che include la saldatura a fascio di elettroni e la saldatura a fascio laser, fonde il materiale direttamente per creare l'oggetto. È utilizzato principalmente per materiali metallici.

Stampa 3D a laminazione: In questa tecnica, strati di materiale in foglio vengono tagliati e sovrapposti per creare l'oggetto. È comunemente impiegata per la produzione di prototipi a basso costo.

In seguito, esploreremo le tecniche di stampa 3D più adatte all'industria aerospaziale, con un focus su quelle impiegate da GE Aerospace. Queste tecnologie comprendono i cosiddetti processi a letto di polvere, Selective Laser Melting (SLM), l'Electron Beam Melting (EBM) e il Binder Jetting.

Questi metodi, basati sulla fusione selettiva di polvere mediante laser e fascio di elettroni o il deposito diretto di materiale, offrono la precisione e la resistenza richieste dall'industria aerospaziale e sono impiegate per una varietà di applicazioni cruciali, tra cui:

Strutture di supporto – componenti progettati per sostenere e stabilizzare altre parti all'interno di un sistema.

Elementi per la propulsione – ad esempio ugelli dei motori

Inseriti – componenti specializzati inseriti in altre parti per migliorare le prestazioni, la resistenza o la funzionalità complessiva dell'elemento.

Guide d'onda – per gestire e indirizzare onde elettromagnetiche e gestire le comunicazioni e altre applicazioni aerospaziali.

Elementi di supporto alla vita dell'equipaggio.

Pannelli termo strutturali – componenti che combinano proprietà termiche e strutturali. [7]

2.5 Vantaggi e Limiti dell'Additive Manufacturing

Nonostante le diverse tecniche di fabbricazione additiva presentino caratteristiche individuali con vantaggi e svantaggi specifici, è possibile individuare dei benefici e dei limiti comuni allo stampaggio 3D, che possono essere distinti in base al prodotto e al processo.

| | PRODOTTO | PROCESSO |
|-----------|--|---|
| VANTAGGI | <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Libertà di progettazione <input type="checkbox"/> Strutture più leggere <input type="checkbox"/> Componente unico <input type="checkbox"/> Design ergonomico <input type="checkbox"/> Personalizzazione | <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Una macchina <input type="checkbox"/> Stampi o utensili speciali non necessari <input type="checkbox"/> Una fase di produzione <input type="checkbox"/> Ridotto intervento dell'operatore <input type="checkbox"/> Tempi e costi indipendenti dalla complessità |
| SVANTAGGI | <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Le sporgenze richiedono supporti <input type="checkbox"/> Numero limitato di materiali in commercio <input type="checkbox"/> Costo elevato dei materiali <input type="checkbox"/> Bassa finitura superficiale | <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Velocità di produzione limitata <input type="checkbox"/> Dimensioni del pezzo limitate da quelle della macchina <input type="checkbox"/> Alto livello di know-how <input type="checkbox"/> Nessuna modifica ammessa in fase di progettazione <input type="checkbox"/> Alto investimento iniziale |

Esaminando i benefici associati al prodotto, l'utilizzo della stampa 3D consente di godere di una libertà di progettazione quasi illimitata. Questo significa che forme estremamente complesse possono essere realizzate senza restrizioni, superando le limitazioni delle tecniche tradizionali.

Grazie all'efficienza nell'uso dei materiali, i componenti stampati in 3D presentano una struttura più leggera rispetto a quelli prodotti con metodi tradizionali. L'approccio additivo consente di utilizzare solo la quantità necessaria di materiale, riducendo gli sprechi e ottimizzando i costi di produzione.

Inoltre, i componenti vengono stampati come un unico pezzo integrato, eliminando la necessità di assemblaggio. Ciò semplifica notevolmente anche i processi produttivi.

Come menzionato in precedenza, la stampa 3D riduce significativamente la quantità di scarti di materiale rispetto ai processi "sottrattivi" convenzionali, perché posiziona il materiale solo dove serve. Questa caratteristica permette inoltre di ottenere componenti ergonomici.

Infine, la stampa 3D offre un alto grado di personalizzazione, che è sempre più richiesto nel mercato dei consumatori. Non è necessario cambiare macchine o attrezzature, ma basta disporre dei modelli CAD appropriati per ottenere il livello desiderato di personalizzazione.

Quando si considerano i vantaggi del processo, è importante notare che l'utilizzo di modelli 3D digitali, che possono essere trasferiti in tutto il

mondo quasi istantaneamente e a costi trascurabili, elimina la necessità di conservare fisicamente gli oggetti, portando a un notevole risparmio di spese. Inoltre, si riduce il numero di fasi produttive e si elimina la necessità di tempi di attrezzaggio. Ciò si traduce in una notevole velocità nella realizzazione del prodotto dopo aver progettato il componente.

I tempi e i costi di produzione dipendono esclusivamente dalle dimensioni del prodotto. Da ciò derivano due importanti conseguenze: la complessità e la varietà di forme non comportano costi aggiuntivi.

Tornando al prodotto e ai suoi limiti, la necessità di supporti comporta un aumento del materiale di scarto, specialmente per componenti con parti sporgenti, per cui ne sono necessari in quantità maggiore. Inoltre, l'uso di più supporti risulta in una superficie meno definita, rendendo necessario un post-trattamento del pezzo.

Per quanto riguarda i materiali, la disponibilità sul mercato è ancora limitata rispetto alle tecniche tradizionali e i costi sono spesso elevati poiché venduti esclusivamente dalle aziende produttrici delle macchine, che possono applicare prezzi monopolistici. Inoltre, soprattutto per le polveri metalliche, i trattamenti necessari per ottenere una materia prima con le specifiche richieste sono molto complessi e costosi.

Infine, per quanto riguarda i limiti del processo, i volumi di lavoro sono limitati e le dimensioni dei pezzi sono vincolate alle dimensioni della macchina utilizzata. Attualmente la macchina può utilizzare una gamma ristretta di materiali, limitando la flessibilità di produzione. Ciò implica che la scelta dei materiali disponibili può influenzare le possibilità di realizzazione dei pezzi desiderati.

Un altro aspetto da considerare è l'impossibilità di effettuare controlli durante il processo di produzione, poiché attualmente mancano sistemi in grado di effettuare verifiche in tempo reale per garantire la qualità del prodotto o eventuali errori durante la realizzazione.

Capitolo 3: GE Aerospace: Profilo aziendale e contesto industriale

3.1 Presentazione di General Electric

General Electric (GE) ha una struttura organizzativa che supporta la sua evoluzione in una società sempre più digitale e all'avanguardia. Questa trasformazione e la sua posizione di vertice sono chiaramente riflesse nella visione e nella missione aziendale di GE.

La struttura organizzativa è stata adattata nel tempo per fornire il necessario supporto alle diverse filiali o segmenti. Ad esempio, GE ha implementato caratteristiche strutturali che consentono a ciascun segmento operativo di sviluppare prodotti e condurre campagne di marketing specifiche per il proprio settore. Grazie a questa struttura aziendale, GE continua a crescere ed è una delle principali aziende a livello globale.

L'organigramma di GE ha un impatto diretto sulle pratiche di gestione dell'azienda, influenzando le decisioni dei manager nella definizione delle strategie competitive e di crescita. Le caratteristiche strutturali sono un elemento chiave delle capacità aziendali e devono essere adattate per migliorare il supporto alla crescita e la competitività, tenendo conto della concorrenza da parte di altre aziende come Siemens e 3M.

GE è un'azienda multidivisionale e si concentra sull'ottimizzazione delle operazioni in settori diversi ma interconnessi. Ogni divisione ha responsabili che sviluppano strategie specifiche per i rispettivi settori, come nel caso dell'aviazione. Questa struttura supporta l'efficacia di GE nella diversificazione e nell'affrontare sfide settoriali specifiche. Le divisioni aziendali, come Additive, Aerospace, Capital, Digital, Energy e renewable energy, sono centrali nella struttura aziendale di GE.

Inoltre, GE utilizza team aziendali a livello organizzativo per garantire la coerenza tra le divisioni e per mantenere un conglomerato stabile. Questi gruppi collaborano con i dipartimenti centrali e la leadership aziendale.

Infine, le divisioni geografiche sono utilizzate per analizzare e riportare i dati aziendali, tenendo conto delle differenze geografiche tra i mercati.

Questa struttura aiuta a gestire le operazioni locali, le scorte e la catena di approvvigionamento.

In sintesi, la struttura organizzativa di General Electric è progettata per sostenere il suo sviluppo strategico nei diversi settori e garantire la coerenza aziendale. Tuttavia, la sfida principale risiede nell'allineare le strategie tra le divisioni operative, richiedendo un maggiore sforzo di coordinamento. [8]

3.2 Ruolo dell'Additive Manufacturing in GE Aerospace

Le esigenze che generalmente i clienti del settore aerospaziale vogliono soddisfatte dai produttori del lavoro spaziano su vari fronti:

1. Affidabilità e longevità dei motori, con parti che mantengano elevate prestazioni nel tempo.
2. Efficienza dei motori, con consumi energetici ridotti, per un minore impatto ambientale e costi operativi inferiori.
3. Sostenibilità dell'aeromobile, anche portato dalle regolamentazioni sempre più rigide che richiedono basse emissioni e processi di produzione eco-sostenibili.
4. Manutenzione programmabile, poiché la possibilità di prevedere e pianificare la manutenzione riduce le interruzioni operative e minimizza i costi associati a rotture impreviste.

Per soddisfare queste esigenze, le aziende devono abbracciare tecnologie innovative nel processo di sviluppo dei loro prodotti. Tra queste, l'Additive Manufacturing svolge un ruolo rilevante. Questa tecnica offre la possibilità di produrre componenti più affidabili, efficienti ed eco-sostenibili, fornendo un netto vantaggio competitivo.

Le ragioni che hanno spinto GE a investire nell'AM sono molteplici:

Integrazione delle funzioni: L'AM permette la realizzazione di geometrie intricate e compatte, incluso il posizionamento di passaggi interni per fluidi o aria. Questa caratteristica ottimizza il flusso e il raffreddamento dei motori, migliorandone le prestazioni.

Riduzione del peso: La capacità di depositare materiale solo dove è necessario elimina gli sprechi e le parti superflue. Ciò si traduce in componenti più leggeri e, conseguentemente, in aeromobili più efficienti.

Semplificazione delle parti e riduzione dei costi: L'AM consente la creazione di componenti complessi in un'unica stampa, semplificando l'assemblaggio e abbassando i costi di produzione.

Riduzione dei tempi di sviluppo e maggiore libertà di riprogettazione: L'AM accelera il processo di sviluppo grazie alla prototipazione rapida, consentendo iterazioni più veloci e un design ottimizzato.

Migliori proprietà dei materiali: L'AM permette l'uso di materiali avanzati con proprietà meccaniche e termiche superiori rispetto ai processi tradizionali.

Processo ecologico: La produzione additiva riduce lo spreco di materiale e offre la possibilità di riciclare la polvere inutilizzata, contribuendo a una produzione più sostenibile.

Utilizzo di materiali "difficili": L'AM è ideale per lavorare materiali complessi da fondere, aprendo nuove opportunità di mercato.

Un esempio tangibile è l'ugello del carburante del motore LEAP, prodotto da Avio Aero tramite AM, che ha dimostrato un'ottimizzazione sorprendente, passando da 20 pezzi a uno unico, garantendo una durata cinque volte maggiore e riducendo il peso del 25%. Non solo l'AM rivoluziona la produzione di componenti nuovi, ma si dimostra essenziale anche per le riparazioni, prolungando la vita delle parti e favorendo la sostenibilità.

In linea con questo impegno, GE Additive, business di General Electric, sta persino sviluppando una stampante 3D a laser con quattro fonti di energia, un passo ulteriore verso l'aumento della produttività e l'innovazione costante. [9]

3.2.1 Stampa 3D di Motori Jet per Aeroplani

La stampa 3D sta già avendo un impatto significativo nello sviluppo e nella produzione di prototipi di motori a reazione e parti destinate all'uso finale. Ad esempio, il motore GE9X, che utilizza diversi componenti stampati in 3D, rappresenta una pietra miliare in termini di dimensioni e potenza.

Un altro esempio è dato dai motori LEAP-1A, prodotti da CFM International, una società congiunta al 50% tra GE e Safran Aircraft

Engines, sono stati commissionati da Airbus nel 2016 per il suo jet passeggeri A320 di nuova generazione. Questi motori. [10]

L'utilizzo della stampa 3D è stato evidente anche nei test dei prototipi funzionali. Nel 2017, in collaborazione con l'esercito degli Stati Uniti, GE Aerospace ha completato i test dei prototipi del motore a turbina Future Affordable (FATE), dove la fabbricazione additiva è stata essenziale per la progettazione e la produzione dell'impianto turbina del prototipo. Il motore FATE ha ottenuto livelli di efficienza e prestazioni eccezionali, riducendo il consumo di carburante del 35% e i costi di produzione e manutenzione del 45% rispetto agli attuali motori in campo.

Infine, il motore ITP, destinato a sostituire i motori degli elicotteri Apache e Black Hawk, mira a garantire un risparmio di carburante del 25% e una riduzione dei costi di produzione del 35%. Il prototipo T901 del modello di produzione proposto utilizza parti stampate in 3D, beneficiando delle conoscenze precedentemente acquisite nello sviluppo del motore commerciale LEAP.

3.2.2 Stampa 3D di Parti di Aeroplani

Nel mese di aprile del 2015, GE Aerospace ha ottenuto la sua prima autorizzazione dalla Federal Aviation Administration (FAA) per l'impiego di una componente realizzata tramite stampa 3D. Questa particolare componente è l'alloggiamento del sensore di temperatura dell'ingresso del compressore, prodotta mediante l'utilizzo di una tecnologia di sinterizzazione laser selettiva (SLS). In collaborazione con Boeing, GE ha stabilito un accordo per l'incorporazione di questa componente in oltre 400 motori GE90-94B, destinati ad equipaggiare i velivoli Boeing 777.

I combustori all'interno dei motori a reazione sono universalmente noti per la loro complessità di produzione attraverso metodi convenzionali. Sfruttando un processo di fabbricazione additiva con polvere in lega cobalto-cromo come materiale di base, vengono creati componenti di elevata qualità che garantiscono una protezione affidabile per l'elettronica estremamente sensibile del sensore di temperatura. Questa soluzione previene efficacemente l'interferenza da parte dei flussi d'aria in aumento e l'accumulo di ghiaccio all'interno del motore. Oltre alla produzione dell'alloggiamento del sensore, i processi di stampa 3D sono impiegati per la creazione di altre parti aeronautiche, incluso l'equipaggiamento dei sistemi di canalizzazione.

La tecnica della fabbricazione additiva offre altresì la possibilità di creare utensili avanzati per l'industria aerospaziale. Nel 2016, ricercatori dell'Oak Ridge National Laboratory (ORNL) hanno sviluppato uno strumento di rifinitura e foratura destinato a facilitare la produzione delle ali dell'aereo 777X di Boeing. Questo strumento speciale, con dimensioni di 5,3 metri in lunghezza, 1,6 metri in larghezza e 0,5 metri in altezza, è stato stampato utilizzando una combinazione di fibra di carbonio e plastica composita. La realizzazione di questo dispositivo, con un peso di 748 kg, ha richiesto circa 30 ore. [29]

3.2.3 Stampa 3D nello Spazio

La produzione per le applicazioni spaziali richiede un livello di precisione estremamente elevato perché anche la più piccola imprecisione o difetto potrebbe avere conseguenze disastrose in un ambiente così estremo e inospitale come lo spazio. Ogni componente e sistema destinato all'uso nello spazio deve essere progettato e realizzato con la massima precisione e affidabilità per garantire il successo delle missioni spaziali e la sicurezza degli astronauti o delle sonde spaziali coinvolte. Inoltre, la manutenzione o la riparazione in orbita è estremamente difficile, se non impossibile; è quindi fondamentale che tutto funzioni perfettamente sin dall'inizio. Questo livello di precisione richiede tecnologie avanzate, che può essere ottenuto tramite processi di fabbricazione additiva come Electron Beam Melting (EBM) e Direct Laser Melting (DLM), che arrivano a uno spessore del singolo strato di soli 20 o 40 micron.

L'impiego della fabbricazione additiva per lo spazio è sempre più frequente; presso il Marshall Space Flight Center (MSFC) di Huntsville, in Alabama, i ricercatori della NASA hanno creato e realizzato un prototipo funzionale di iniettore per razzi in due parti attraverso la stampa 3D. Questo iniettore, un tempo costituito da 163 parti, rispetta i requisiti di prestazione del suo predecessore, ma con una notevole ottimizzazione. La realizzazione del componente stampato in 3D, caratterizzato da un design notevolmente semplificato, rispetta rigorosi standard in termini di proprietà meccaniche e di resistenza al calore, tutto ciò contribuendo a ridurre i tempi di produzione e assemblaggio.

Gli esperimenti di stampa 3D condotti sulla Stazione Spaziale Internazionale (ISS) hanno lo scopo di valutare l'applicabilità della tecnologia di stampa 3D nello spazio. Nel 2014, gli astronauti a bordo dell'ISS hanno prodotto la loro prima parte in plastica mediante una stampante 3D. Le parti realizzate nello spazio sono state riportate sulla

Terra per valutare se l'assenza di gravità avesse influito sulle proprietà meccaniche o su altre caratteristiche cruciali.

Inoltre, la tecnologia di stampa on demand potrebbe rivelarsi essenziale per i piani di viaggio verso Marte. La capacità di creare strumenti e pezzi di ricambio a milioni di chilometri di distanza dalla Terra e quando se ne ha bisogno si rivela fondamentale per gestire le sfide e contenere i costi. In alcune proiezioni, è previsto che alcuni dei materiali necessari per la stampa 3D potrebbero essere estratti direttamente dalla superficie di Marte. [11]

3.3 Processi di Stampa 3D per Metalli Utilizzati da GE Aerospace

Nel contesto delle applicazioni, GE Aerospace adotta una serie di metodologie di Additive Manufacturing (AM) per la produzione di componenti in metallo, concentrandosi sull'utilizzo delle tecnologie a letto di polvere, poiché permettono di ottenere prodotti più affidabili e resistenti, qualità fondamentali per soddisfare i rigidi standard richiesti dall'industria aerospaziale.

Le tecnologie AM a letto di polvere consentono a GE Aerospace di raggiungere questi obiettivi:

- **Utilizzo di materiali ad alte prestazioni:** Le tecnologie a letto di polvere supportano una vasta gamma di materiali metallici ad alte prestazioni, come leghe di titanio e superleghe. Questi materiali sono noti per la loro resistenza meccanica, resistenza alla corrosione e proprietà termiche, rendendoli ideali per applicazioni in cui la sicurezza e l'affidabilità sono prioritari, come nel settore aerospaziale.
- **Progettazione di strutture complesse:** La capacità di produrre componenti in metallo con geometrie complesse e dettagli intricati è essenziale nell'industria aerospaziale. Le tecnologie a letto di polvere consentono la realizzazione di parti con forme elaborate, consentendo la massima ottimizzazione della struttura e riducendo la necessità di assemblaggi multipli o supporti addizionali, data la struttura tipica di queste tecnologie.
- **Risparmio di materiale:** Il processo a letto di polvere minimizza gli sprechi di materiale, in quanto il materiale in polvere non utilizzato può essere facilmente riciclato. Questo si allinea con l'attenzione

all'efficienza e alla sostenibilità, due aspetti cruciali nell'industria moderna.

- Raffreddamento controllato: Durante il processo a letto di polvere, i materiali possono raffreddarsi gradualmente, riducendo il rischio di tensioni residue. Questo contribuisce a garantire la stabilità strutturale e le proprietà meccaniche dei componenti, riducendo la probabilità di guasti.
- Produzione su larga scala: Le tecnologie a letto di polvere sono adatte alla produzione su larga scala di componenti, poiché più pezzi possono essere prodotti in un unico ciclo di stampa, impilandoli.

Di seguito verranno esaminati i metodi su cui GE Aerospace si focalizza per la prototipazione o produzione di componenti.

3.3.1 Direct Metal Laser Melting (DLM)

Questa tecnica, insieme all'EBM, rappresenta una delle tecnologie a letto di polvere ed è di fondamentale importanza nella produzione di componenti finali in metallo.

In passato, tale metodologia era nota come Selective Laser Sintering (SLS). In quel periodo, le fonti di energia non possedevano la potenza necessaria per fondere la polvere metallica; ciò consentiva unicamente il processo di sinterizzazione.

Nell'illustrazione di seguito è rappresentato il procedimento, il quale, in linea con il principio generale dell'EBM, si articola come segue.

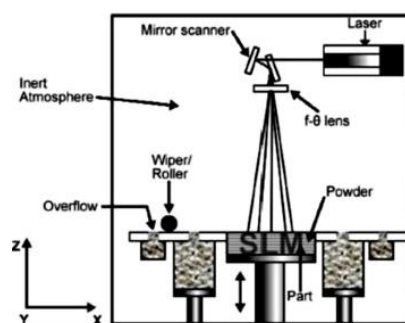


Figura 3.1: Processo di DLM

Il componente viene creato all'interno della piattaforma operativa, la quale si abbassa lungo l'asse z per agevolare la crescita del pezzo. La polvere è collocata all'interno di due depressioni poste ai lati ed è uniformemente

distribuita mediante un'apposita spatola detta "racla". Gli eccessi di polvere sono recuperati tramite gli "overflow", dei piccoli serbatoi posti alle estremità.

La sorgente di energia che provoca la fusione del metallo è un raggio laser, per lo più generato da un cristallo di granato di ittrio e alluminio drogato al neodimio, posizionato in alto a destra della macchina in maniera stabile. Questo raggio viene indirizzato perpendicolarmente alla piattaforma grazie a specchi e lenti speciali.

Una volta depositata sulla base di lavoro dalla racla, la polvere viene fusa dal laser in maniera selettiva, la piattaforma si abbassa tanto quanto è lo spessore dello strato successivo ed il processo si ripete così via fino al completamento del pezzo. Il laser, inoltre, non fonde solamente lo strato superficiale, ma anche parzialmente lo strato sottostante, per permettere la completa adesione degli strati.

L'area di lavoro è portata ad una condizione inerte, introducendo azoto per gli acciai o argon per le leghe radioattive, per evitare l'ossidazione delle polveri quando surriscaldate.

In linea teorica, il letto di polvere dovrebbe essere in grado di sostenere il pezzo, come avviene per l'EBM. Tuttavia, è importante considerare che l'ambiente circostante alla camera è mantenuto a temperatura ambiente. La polvere, pertanto, parte da una temperatura ambiente, raggiunge temperature di circa 800°C nella regione illuminata dal laser e si raffredda quasi istantaneamente grazie alla polvere circostante, ritornando alla temperatura dell'ambiente circostante.

A causa di questo rapido cambiamento termico, si crea un elevato gradiente di temperatura. Per prevenire deformazioni, specialmente in sezioni sporgenti, si rende necessario utilizzare supporti che ancorino il pezzo e lo stabilizzino saldamente alla piattaforma. Se il componente fosse privo di questi supporti, durante il processo di raffreddamento potrebbe verificarsi il sollevamento di alcune sezioni, senza considerare che quando la spatola si sposta per distribuire uno nuovo strato di polvere, potrebbe urtare contro le sezioni deformate.

I componenti prodotti tramite questa tecnologia possiedono caratteristiche meccaniche e metallurgiche migliori se comparate con gli stessi prodotti con tecniche tradizionali, poiché il raffreddamento pressoché istantaneo forma dei grani finissimi. Qualora il componente necessitasse di proprietà particolari quali resistenza termica o resistenza al fenomeno di creep, si

possono impiegare trattamenti termici per ingrandirne i grani cristallini. Se comparati con i grani che si creano in processi di fonderia, quelli di un componente stampato sono molto più piccoli ed uniformi rispetto ad un componente fuso, che presenta grani fini lungo la superficie e più grandi man mano che ci si avvicina al cuore.

Tanto i supporti quanto la piattaforma di costruzione devono essere costituiti dallo stesso materiale utilizzato per il pezzo, per permettere la migliore aderenza possibile. Dal momento che i supporti sono dello stesso materiale, la loro rimozione non è sempre facile e spesso si impiega l'elettroerosione a filo, seguita da eventuali lavorazioni di finitura. La stessa problematica legata ai supporti si presenta anche per operazioni di fonderia, dove si deve agire per rimuovere materozze o bave. Tuttavia, l'AM permette di realizzare geometrie molto più complesse. Inoltre, sempre rispetto alla fonderia, l'apporto energetico necessario per stampare un componente è nettamente inferiore, con un risparmio dell'ordine di 103 watt.

La radiazione laser provoca su materiali diversi reazioni uniche, che possono essere controllate con una macchina dotata di un set di parametri specifici. Questi parametri sono stati introdotti al fine di controllare il processo produttivo il più accuratamente possibile e garantire un livello di densità nel prodotto che si avvicini al 100%.

Questi parametri sono:

- La quantità di energia laser impiegata, con un range che va dai 160 ai 200 W.
- La velocità con cui la sorgente termica si sposta sulla superficie, tra 60 e 150 μs .
- La distanza tra due passate adiacenti del laser – *hatch distance* – con un range tra 80 e 150 μm .
- La distanza tra due "spot" laser impulsivi – *point distance* – tra 50 e 80 μm

Point distance e hatch distance possono essere apprezzati nella figura 3.2.

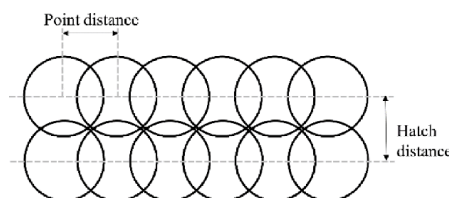


Figura 3.2: Point distance e hatch distance

3.3.2 Electron Beam Melting (EBM)

La tecnologia EBM (Electron Beam Melting) offre un'elevata produttività grazie all'utilizzo di un fascio di elettroni ad alta potenza che consente di fondere la polvere metallica molto più efficacemente del laser. L'unità del fascio di elettroni è costruita con un'elettronica all'avanguardia senza parti in movimento, che permette un controllo del fascio estremamente rapido e accurato, fondendo in più punti contemporaneamente senza compromettere la finitura superficiale, la precisione o la velocità di produzione. Il processo di costruzione EBM, è analogo a quello descritto nel paragrafo del Direct Laser Melting, ma in questo caso si svolge sottovuoto, garantendo un ambiente pulito e controllato e un eccellente isolamento termico. Si tratta di un processo ad alta temperatura, che consente di ottenere componenti sottoposti a stress con proprietà del materiale migliori rispetto alla fusione e paragonabili a quelle della lavorazione.

Lo schema di un sistema EBM, in figura 3.3, mostra la colonna del fascio di elettroni con il filamento (o catodo) dove vengono generate le particelle. Il fascio è controllato con lenti elettromagnetiche (bobine) più in basso nella colonna. La camera del vuoto contiene le tramogge della polvere, utilizzate come deposito, che alimentano il tavolo di costruzione per gravità. La racla preleva la polvere da ogni lato per distribuire uno strato uniforme sul tavolo di costruzione, fuso selettivamente dal fascio di elettroni. L'ultimo step prevede che la piattaforma di costruzione venga abbassata prima di applicare e fondere lo strato successivo.

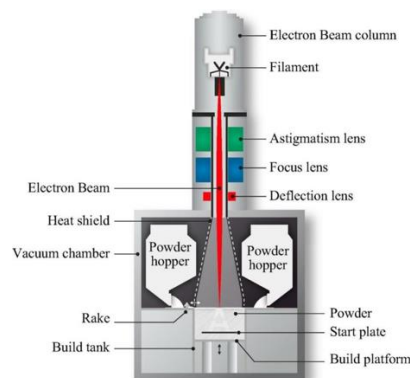


Figura 3.3: Schema del processo EBM

L'utilizzo di un fascio di elettroni come fonte di energia per fondere la polvere metallica offre diversi benefici rispetto al laser.

Un vantaggio notevole è la capacità dell'elettrone di arrivare in profondità nel materiale e di fondere in modo omogeneo le particelle di polvere. Ciò facilita la fusione di metalli altamente riflettenti senza il rischio di

vaporizzare la superficie della particella prima di fondere il nucleo. La dispersione di energia nell'EBM, comparata a quella del laser, può essere apprezzata nella figura 3.4.

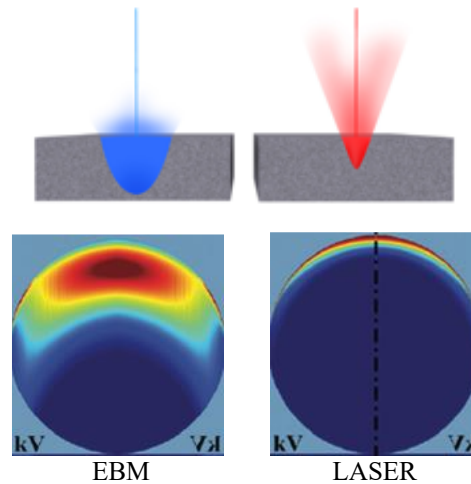


Figura 3.4: Trasferimento di energia nella polvere di Ti64 utilizzando la tecnologia EBM (a sinistra) e laser (a destra).

L'elevata efficienza di assorbimento dei materiali utilizzati nell'EBM comporta un'elevata efficienza energetica per l'intero processo. Ne consegue un basso consumo di energia.

Inoltre, il processo EBM consente l'utilizzo di particelle di polvere più grandi e la realizzazione di uno strato più spesso, per un processo più produttivo.

Le bobine elettroniche consentono un controllo del fascio elettromagnetico estremamente rapido, gestendo la posizione, la dimensione e l'astigmatismo dei fasci. Grazie all'assenza di parti meccaniche in movimento nel controllo del fascio, esso può essere modificato agevolmente, raggiungendo velocità di 8000 m/s nell'area di costruzione.

Un'altra caratteristica unica dell'EBM è la capacità di mantenere l'intera costruzione ad una temperatura elevata, se necessario, superiore a 1.000 °C. Per ogni strato della costruzione, il fascio di elettroni riscalda l'intero letto di polvere a una temperatura di processo ottimale, specifica per il materiale utilizzato. Ciò garantisce una microstruttura corretta e pezzi privi di tensioni residue. Inoltre, elimina la necessità di trattamenti termici successivi al processo, che hanno un impatto significativo sul costo totale di produzione.

Il processo a caldo consente di produrre in modo additivo anche leghe estremamente fragili e soggette a cricche.

Ad esempio, le pale delle turbine del motore GE9X, prodotte da Avio Aero, sono prodotte con una lega di alluminio di titanio (TiAl) tramite EBM, l'unico metodo di fabbricazione additiva disponibile in commercio per questo tipo di lega.

Inoltre, la polvere di metallo intorno al pezzo da costruire viene lievemente sinterizzata grazie all'elevata temperatura della camera. Ciò significa che le particelle di polvere metallica vengono riscaldate e leggermente attaccate l'una all'altra, senza raggiungere la temperatura di fusione. In questo modo si crea un ambiente stabile per il pezzo da costruire.

La polvere sinterizzata che circonda il pezzo offre diversi vantaggi:

- Agisce come struttura di supporto per il pezzo da costruire e nella maggior parte dei casi, non sono necessarie ulteriori strutture di supporto. Ciò consente una maggiore libertà nella progettazione dei pezzi per aumentare le prestazioni del prodotto.
- La polvere circostante viene utilizzata come elemento di raffreddamento controllato.
- Un minor numero di supporti significa anche meno scarti e più polvere da riutilizzare per la costruzione successiva.
- I pezzi possono essere facilmente rimossi dalla piastra di partenza tramite taglio ad elettroerosione a filo.

Una volta che il processo è completato, la polvere sinterizzata viene rimossa in una stazione di rimozione (PRS). La PRS ha un concetto simile a quello di una cabina di sabbiatura, ma la polvere di produzione viene utilizzata come mezzo stesso della sabbiatura. Lo scopo principale della PRS è quello di rimuovere il materiale in eccesso (powder cake) che si è agglomerato durante il processo di produzione. Le apparecchiature Arcam EBM utilizzate da GE consentono di riutilizzare la polvere in-process estratta dal PRS, la polvere nella camera a vuoto lasciata dopo una costruzione e il panetto di polvere delle costruzioni precedenti.

Se si considera l'intero processo produttivo, l'EBM, a seconda delle caratteristiche del componente che si sta costruendo, presenta un costo per pezzo che può essere inferiore fino al 50%.

Nel caso studio riportato di seguito è stato confrontato il costo per produrre una staffa in Ti64, utilizzando l'Electron Beam Melting da una parte e il Selective Laser Melting dall'altra. Il processo di produzione è stato

suddiviso in sette fasi: preparazione dei dati, impostazione della macchina, tempo di funzionamento della macchina, disimballaggio della macchina, trattamento termico, rimozione del supporto e fresatura.

A seguito di questo studio, L'EBM ha registrato un vantaggio significativo in termini di costi in tutte le fasi, ad eccezione della fresatura. Le fasi con i vantaggi più significativi e maggiori sono:

1. Tempo di esecuzione della macchina: il costo del processo del tempo di esecuzione della macchina è stato influenzato principalmente dal prezzo inferiore della polvere. In questo caso, il prezzo della polvere per l'EBM era inferiore del 49% rispetto a quello del laser. Questa è la parte del confronto dei costi che ha il maggiore impatto in termini di denaro. Le strette possibilità di impilamento e la maggiore velocità di fusione dell'EBM contribuiscono a ridurre i costi di produzione in questa fase.
2. Trattamento termico: Poiché l'EBM è un processo a caldo, il trattamento termico non è necessario per alleviare le tensioni dei componenti.
3. Rimozione dei supporti: I supporti sui pezzi prodotti con EBM sono facilmente rimovibili; pertanto, il costo del processo di rimozione dei supporti è molto basso per l'EBM.

3.3.3 Binder Jetting

Analogamente alle tecnologie basate sul letto di polvere, nel processo di Binder Jetting una testina di stampa deposita un liquido contenente agenti leganti su uno strato sottile di polvere del materiale – sabbia, ceramica, metalli o, più recentemente, alcuni polimeri – seguendo un procedimento che si avvicina molto alla stampa 2D su carta, ripetuto però quanti sono gli strati che compongono il pezzo.

Sviluppata presso il Massachusetts Institute of Technology nel 1990, la licenza fu in seguito acquisita da ExOne nel 1996. Questa azienda lanciò poi, due anni dopo, la prima stampante 3D per metalli basata su questa tecnologia.

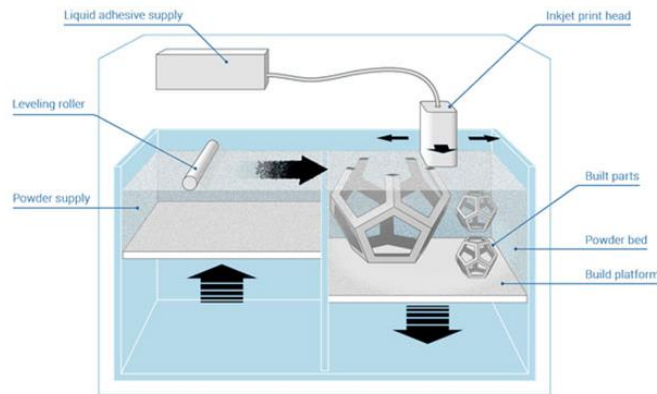


Figura 3.5: Macchina Binder Jetting

La struttura è divisa in due aree, come mostrato in figura 3.5: a sinistra un contenitore con il materiale in polvere, mentre a destra la zona dove verrà stampato il componente. Un rullo trasferisce la polvere dal serbatoio al letto di polvere, su cui successivamente la testina di stampa distribuisce il liquido legante, contenuto nella apposita vaschetta, irrorando solo le zone interessate. Successivamente, la piattaforma che sostiene il pezzo scende, mentre quella contenente la polvere si alza, e il processo si ripete fino al completamento.

Una volta conclusa la stampa, i pezzi vengono liberati dalla polvere in eccesso utilizzando spazzole o aria compressa.

Per quanto riguarda il post-processing, quando si utilizza il furano (C_4H_4O) come legante, il post-processamento non è necessario. In caso contrario, vengono impiegati alcuni metodi (come la polimerizzazione o l'evaporazione) per ottenere fissaggi più duri e resistenti. Nel caso dei metalli, è richiesta la sinterizzazione o l'infiltrazione del componente con materiali a basso punto di fusione.

A differenza delle altre tecnologie AM, che lavorano partendo da un singolo punto in cui il materiale viene fuso, estruso o saldato insieme, la tecnologia del Binder Jetting richiede meno materiale e meno tempo. Questo permette di creare componenti in modo rapido e con maggiore flessibilità nella scelta dei materiali. Per questo motivo, questa tecnologia viene spesso utilizzata per le fasi di prototipazione tecnica e di pre-serie, fasi in cui il prototipo si avvicina per materiale e tecnica impiegata al risultato finale.

3.4 Componenti Prodotti con Additive Manufacturing in GE Aerospace

3.4.1 Catalyst

Il primo prodotto di GE Aerospace composto con parti Additive è il motore Catalyst, un turbopropulsore sviluppato appositamente per l'UAS (Unmanned Aerial System) Eurodrone. Questo sistema aereo senza pilota è stato ideato da Airbus in collaborazione con diverse aziende aerospaziali europee, tra cui Leonardo e Dassault Aviation. Il progetto coinvolge quattro nazioni: Italia, Germania, Francia e Spagna, che saranno anche gli utilizzatori finali di questa tecnologia. L'obiettivo è rafforzare la sovranità europea riducendo la dipendenza da tecnologie straniere. Il programma è gestito dall'Organisation Conjointe de Coopération en Matière d'Armement (OCCAR) e promuove la cooperazione tra le nazioni europee nel settore della difesa e della sicurezza, allo scopo di contenere i costi e migliorarne l'efficienza. [12]

Questo drone autonomo, con capacità multi-missione, sarà impiegato in operazioni di intelligence, sorveglianza, acquisizione di bersagli e ricognizione (conosciute come ISTAR) e per operazioni di sicurezza interna. Il motore Catalyst, installato su questa tecnologia di avanguardia, è stato progettato da Avio Aero da zero ed è stato sviluppato in Italia, Polonia e Germania. Successivamente, è stato testato e assemblato in Repubblica Ceca. Numerosi componenti all'interno del motore Catalyst sono stati fabbricati presso lo stabilimento Avio Aero di Brindisi utilizzando tecnologie di produzione additiva. [13]

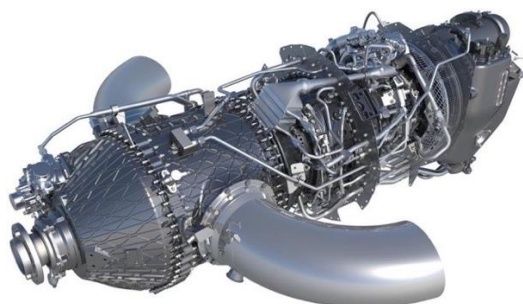


Figura 3.6: Motore Catalyst

Grazie a queste innovazioni, il motore Catalyst si distingue dagli altri turbopropulsori grazie al sistema FADEC (Full Authority Digital Engine Control), sviluppato presso il laboratorio di ricerca Avio Aero a Bari. Questo sistema permette il controllo congiunto del motore e dell'elica, consentendo un'ottimizzazione delle prestazioni. Il motore presenta un consumo di carburante inferiore del 20% rispetto alla media, un rapporto

di compressione pari a 16:1, il più alto nella sua categoria, e offre una potenza di crociera e un carico utile del 10% superiori rispetto ad altri motori turbopropulsori. Inoltre, garantisce dalle due alle tre ore di autonomia in più rispetto alle normali prestazioni di altri motori di questo tipo. [14]

3.4.2 GE9X

Il motore GE9X è un'opera straordinaria dell'ingegneria aeronautica, caratterizzato dall'impiego massiccio di componenti prodotte tramite tecnologia di stampa 3D. Queste componenti avanzate svolgono un ruolo cruciale nell'innovazione e nelle prestazioni eccezionali del motore.

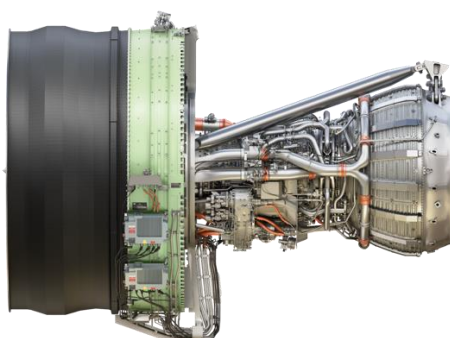


Figura 3.7: Motore GE9X

Innanzitutto, va sottolineato che il GE9X è il più grande e potente motore mai realizzato per aerei commerciali, progettato specificamente per equipaggiare la nuova famiglia di aeromobili Boeing 777X. Le sue caratteristiche avanzate includono una maggiore efficienza, una riduzione delle emissioni e un notevole livello di silenziosità.

Per quanto riguarda le componenti realizzate in 3D, esse sono diverse e ciascuna contribuisce in modo significativo alle prestazioni globali del motore:

1. I 28 ugelli del carburante rappresentano un importante progresso nell'ottimizzazione della miscelazione dei carburanti e nella riduzione delle emissioni. Questi componenti offrono anche un notevole risparmio economico, aumentando la durabilità fino a 5 volte e condensando 20 parti diverse in un unico componente. Il materiale utilizzato per questi ugelli è una lega composta da cobalto e cromo.
2. Le 228 pale della turbina a bassa pressione (LTP), realizzate in lega TiAl (alluminide di titanio), contribuiscono in modo significativo alla

riduzione del peso del motore, del 50%. Inoltre, queste pale consentono l'utilizzo di materiali che altrimenti potrebbero creare cricche.

3. L'alloggiamento del sensore è stato migliorato, diventando il 30% più preciso rispetto alle versioni prodotte con tecniche convenzionali. Inoltre, sono state integrate dieci parti in un unico componente. Questo alloggiamento è realizzato in una lega di cobalto e cromo.
4. Il miscelatore del combustore, realizzato anch'esso in lega di cobalto e cromo, è ora 3 volte più durevole e il 6% più leggero rispetto alle soluzioni tradizionali.
5. Gli 8 induttori ciclonici, realizzati in lega di cobalto e cromo, sono due volte più duraturi e combinano 13 parti in un unico componente. La tecnologia di stampa 3D consente anche di realizzare geometrie estremamente complesse.
6. Lo scambiatore di calore, prodotto in alluminio, ha portato notevoli vantaggi nei costi di produzione, con una riduzione del 25%, unendo ben 163 parti diverse e riducendo il peso complessivo di circa il 40%.
[16]

Il modulo della turbina a bassa pressione LPT è stato sviluppato in collaborazione con Avio Aero, e presenta meno pale rispetto ad altri motori GE, precisamente 16, per una precisione senza eguali. La produzione additiva ha permesso di ridurre il loro spessore, migliorando l'efficienza aerodinamica complessiva. Inoltre, il rapporto tra i diametri delle turbine in sequenza massimizza il flusso d'aria e riduce la resistenza aerodinamica. [17] [22]

Il GE9X è anche notevolmente leggero grazie all'incorporazione di più di 65 componenti a matrice ceramica (CMC), che pesano circa un terzo rispetto alle componenti tradizionali, ma con una resistenza due volte superiore e il 59% in meno di aria richiesta per il raffreddamento.

La certificazione FAA ottenuta nel settembre 2020, dopo intense prove di volo e cicli di test, ha aperto la strada all'installazione del GE9X sui primi Boeing 777X. I rigorosi test sono stati condotti in conformità alla normativa FAR 33 del Federal Aviation Administration (FAA), che

comprende diverse prove e ispezioni per garantire il corretto funzionamento del motore. [18]

Tra i numerosi test effettuati, spiccano il test di vibrazione, il test di sovra coppia, il test di calibrazione, l'over-temperature test, l'operation test, il system and component test e il test di bloccaggio del rotore. In ciascuna di queste valutazioni, il motore è stato sottoposto a condizioni estreme per garantire che soddisfacesse le specifiche progettuali.

Il GE9X è uno dei motori più silenziosi e meno inquinanti sul mercato, con emissioni inferiori del 30% rispetto ai limiti stabiliti dall'ICAO. Ha una spinta slm di fino a 470 kN e un rapporto tra flusso d'aria accelerato del fan e flusso attraverso il ciclo turbogas (BPR) di 10:1. Inoltre, il suo elevato valore di pressione tra il primo compressore e l'ultima turbina (OPR) di circa 60:1 contribuisce a una riduzione del consumo specifico del 5%. [19] [20]

Il costo del programma GE9X è stimato intorno ai 2 miliardi di dollari statunitensi, con un costo unitario di circa 42 milioni di dollari US. [21]

La tecnica di produzione additiva ha anche rivoluzionato la struttura del compressore ad alta pressione del motore turbofan, noto come blisk. Questo componente chiave è stato stampato come un unico pezzo, riducendo notevolmente il numero di parti e ottimizzando l'efficienza complessiva del motore fino all'8% in più rispetto all'approccio tradizionale. Tuttavia, è importante notare che i blisk stampati richiedono una rimozione completa in caso di danni significativi, a differenza delle soluzioni tradizionali. [23]

Capitolo 4: Ottimizzazione attraverso il Riutilizzo delle Polveri

Le tecniche sottrattive tendenzialmente generano molti sprechi, mentre la produzione additiva ha un grande vantaggio: la polvere di metallo può essere riciclata. Questo significa che non è necessario ottenere nuova polvere per ogni pezzo. Invece, i produttori possono recuperare la polvere avanzata dalla prima produzione e usarla per produzioni successive, a condizione che rispetti le specifiche.

Nella maggior parte dei casi, solo una piccola parte della polvere usata durante il processo di costruzione viene effettivamente fusa in un componente. Ciò significa che c'è una quantità significativa di polvere disponibile per il riciclo o lo smaltimento. Riciclando il materiale per progetti futuri, i produttori possono gestire meglio le scorte di polvere, riducendo così la necessità di nuovi ordini e, di conseguenza, abbassando il costo totale per ogni pezzo. Questo contribuisce anche alla sostenibilità del processo.

L'uso di polveri riciclate per produrre componenti a un costo ragionevole è di grande interesse commerciale, purché si soddisfino i requisiti tecnici e le specifiche degli utenti. Questo perché una strategia efficace di riciclo delle polveri è essenziale per garantire la sostenibilità economica e lo sviluppo a lungo termine delle tecnologie Additive.

Tuttavia, i siti produttivi non possono iniziare a riutilizzare la polvere metallica senza prima considerare alcuni fattori che determineranno quanto sia efficace il riutilizzo della polvere metallica.

4.1 Fattori che Influenzano la Riciclabilità della Polvere

Spesso ci si chiede quante volte la polvere possa essere riutilizzata, ma rispondere a questa domanda è un compito complesso. Non esiste una risposta semplice basata su un numero fisso, poiché il riutilizzo della polvere in stampa 3D è influenzato da diverse variabili. Questo paragrafo delinea le complessità legate a questa domanda comune.

Iniziamo col dover stabilire quando una costruzione può essere considerata riuscita o fallita. Questo coinvolge diverse fasi, illustrate nella Figura 4.1, in cui esistono diverse opportunità per la contaminazione della

polvere, l'accumulo di interstiziali e le modifiche delle sue caratteristiche fisiche e chimiche. Per questo motivo, è fondamentale valutare e controllare attentamente ogni aspetto del ciclo della polvere prima di intraprendere uno studio sul suo riutilizzo. [25]



Figura 4.1: ciclo della polvere AM

Inoltre, diversi tipi di produzione additiva richiedono materiali con diverse proprietà. Ad esempio, per le componenti strutturali stampate in 3D in metallo, le caratteristiche meccaniche come la resistenza e la durabilità possono essere di importanza cruciale. Tuttavia, ci sono anche applicazioni in cui sono richieste diverse proprietà. Ad esempio, nel caso del rame utilizzato per la tempra dell'acciaio mediante bobine a induzione, la conduttività elettrica diventa la proprietà chiave per il successo.

In generale, i fattori che influenzano la riciclabilità della polvere sono:

4.1.1 Materiale Utilizzato e Specifiche Desiderate

Il grado di riciclabilità di una polvere metallica è principalmente determinato dalle caratteristiche intrinseche del materiale stesso. Ad esempio, diversi tipi di acciai tendono a conservare le loro proprietà chimiche nel tempo meglio del titanio o delle leghe di alluminio. Ogni materiale invecchia in modi diversi, influenzando la sua capacità di essere riciclato.

Inoltre, la necessità di specifiche più stringenti, come quelle richieste per le polveri utilizzate nella produzione di componenti aerospaziali, può limitare il numero di volte in cui possono essere riciclate. Queste polveri, nel corso dei cicli, possono accumulare impurità che alterano le proprietà rispetto a quelle desiderate.

In generale, la scelta della polvere dovrebbe essere basata sull'applicazione prevista. Ha senso acquistare materie prime con specifiche di acquisto più vicine a quelle di produzione e, di conseguenza, a costo inferiore, se si prevede che il tasso di riciclabilità sarà limitato e si potrà riutilizzare la polvere solo una o due volte prima di uscire dai limiti desiderati. Tuttavia, se l'obiettivo è una politica di riciclo più rigorosa, è più conveniente investire in polveri con una maggiore tolleranza per le impurità, anche se ciò comporta un costo iniziale più elevato.

4.1.2 Pezzo da Produrre

Un altro elemento fondamentale nella strategia di riutilizzo dei materiali è il tipo di componente che si intende fabbricare. Nel caso di manufatti semplici, le opportunità di riutilizzo sono più ampie. Tuttavia, per componenti più complessi, la riciclabilità delle polveri rimane possibile, ma dipende dalla modalità in cui viene condotto il processo.

Ciò è legato all'alterazione delle proprietà causata dall'esposizione a temperature elevate. La sorgente di energia utilizzata per la fusione, come il laser o il fascio di elettroni, genera una zona termicamente alterata non solo nelle particelle da fondere, ma anche nelle parti circostanti e le particelle nella zona interessata assorbono le molecole di ossigeno, azoto e acqua presenti nell'ambiente.

Va da sé che se il componente da realizzare ha una geometria semplice, con aree limitate a contatto con la sorgente di calore, la polvere residua alla fine del processo manterrà principalmente le sue caratteristiche originali, con una piccola parte che potrebbe subire surriscaldamento. Tuttavia, se si sta producendo una forma più complessa, come ad esempio un ugello di carburante, la struttura è più intricata e ci saranno più aree colpite dal calore, causando un invecchiamento più aggressivo della polvere. L'interazione tra il materiale fuso e la polvere è la causa principale dell'invecchiamento della polvere stessa.

4.1.3 Macchina e Parametri di Processo

Oltre al tipo di componente da realizzare, l'architettura della macchina svolge un ruolo cruciale per il successo del riciclo della polvere.

Le proprietà del materiale sono fortemente influenzate dalla configurazione della macchina e dai parametri di processo. Non è sufficiente acquistare la materia prima con le specifiche corrette, poiché

ciascun materiale reagisce in modo unico in ogni macchina e con ogni insieme di parametri di processo.

Una camera di costruzione e un sistema di fabbricazione additiva perfettamente sigillati possono estendere i cicli di riutilizzo del materiale rispetto a un sistema che presenta perdite di aria e umidità nella camera di costruzione, fattori che costantemente influiscono sulla qualità dei componenti.

Dal punto di vista dell'architettura della macchina, un sistema con un setaccio interno può rappresentare una soluzione vantaggiosa per il riciclo del materiale. In questo modo, tutto il processo avviene internamente, riducendo i livelli di impurità. Nella maggior parte delle macchine, la polvere viene raccolta in una tramoggia esterna, che deve essere vagliata e quindi reintrodotta nella macchina. L'internalizzazione del processo ridurrebbe anche il tempo di lavoro richiesto, portando a un abbassamento dei costi complessivi.

Inoltre, alcuni fornitori di polveri per la fabbricazione additiva forniscono alle officine linee guida su come una specifica polvere AM si comporterà in una data macchina con parametri di processo specifici, garantendo che il materiale sia stato testato e che siano forniti risultati specifici agli utenti. Questo aspetto riveste una notevole importanza poiché permette di standardizzare le polveri e di rendere il processo AM più affidabile.

4.1.4 Fattore Umano

Infine, gli operatori costituiscono una possibile fonte di variazione.

Per fortuna, questo aspetto può essere controllato. È necessaria una scrupolosa attenzione nella documentazione delle procedure di lavoro standard, non solo per quanto riguarda il funzionamento e la manutenzione della macchina additiva, ma anche in ogni fase del ciclo della polvere.

Le variazioni che possono derivare dall'interazione dell'elemento umano con il processo di riutilizzo delle polveri riguardano il corretto maneggiamento delle polveri in eccesso, la loro adeguata conservazione e stoccaggio, la prevenzione della contaminazione derivante dalle operazioni di pulizia della macchina o dalla preparazione delle parti.

4.2 Strategie di Riutilizzo delle Polveri

Ci sono varie metodologie per il riutilizzo delle polveri, e la scelta di un approccio rispetto a un altro è condizionata dai costi, dalla qualità e dalla

facilità di attuazione, i quali possono variare a seconda del contesto specifico.

Ad esempio, nella macchina EBM Arcam utilizzata da Avio Aero, la tramoggia di dosaggio è organizzata secondo un principio FIFO (First-In-First-Out), mentre nella DMLM, la camera di dosaggio segue un principio LIFO (Last-In-First-Out). Questa diversità comporta la possibilità che la polvere DMLM, a seconda della strategia di riutilizzo adottata, possa rimanere nella camera di dosaggio per più cicli di produzione. Il numero di riutilizzi in questo caso rimane costante fino a quando la polvere attraversa la piastra di costruzione, e le potenziali problematiche legate allo stoccaggio all'interno della macchina devono essere affrontate in modo appropriato.

4.2.1 Strategia a Due Contenitori

In questa pratica di riciclo, inizialmente, un lotto di polvere vergine viene caricato nella macchina, e la stampa viene eseguita. Una volta completato il processo, l'eccesso di polvere e quella non consolidata vengono estratte dalla macchina AM e immagazzinate in un contenitore etichettato come "primo utilizzo". Successivamente, la macchina AM viene riempita con un altro lotto di polvere vergine dello stesso tipo, e il processo si ripete finché non rimane più polvere vergine disponibile per la ricarica. Una volta esaurito l'intero lotto di polvere vergine, la polvere dal contenitore "primo utilizzo" viene vagliata e utilizzata per rifornire la macchina. Qualsiasi polvere rimanente da cicli precedenti viene trasferita in un secondo contenitore identificato come "secondo utilizzo". Questo procedimento continua fino a quando viene raggiunto il numero massimo di riutilizzi definito o finché non c'è più polvere sufficiente per il processo di produzione.

Questo metodo consente di tenere traccia del numero di riutilizzi effettuati. Tuttavia, con il passare dei cicli, aumenta la presenza di impurità interstiziali fino a raggiungere una situazione in cui la polvere non soddisfa più i requisiti specifici.

4.2.2 Metodo della Polvere "Ringiovanita"

Un altro approccio ampiamente adottato riguarda il rinnovo della polvere usata, utilizzando polvere vergine dello stesso tipo, oppure, in alcuni casi, persino una polvere diversa al fine di compensare l'esaurimento di specifici elementi o per mantenere le proprietà chimiche desiderate. Se si sceglie di rinnovare la polvere con polvere vergine, il processo inizia con una fornitura di polvere nuova che viene divisa in due parti. Una parte è la

"fornitura principale", mentre l'altra parte viene mantenuta separata e etichettata come "top-up" per il rinnovo della polvere usata.

Inizialmente, la polvere vergine dalla fornitura principale viene caricata nella macchina AM e la stampa viene eseguita. Al termine del processo, la polvere in eccesso e la polvere non consolidata del letto di polvere seguono lo stesso processo del metodo dei due contenitori e vengono conservate in un contenitore etichettato come "primo utilizzo". La macchina AM viene quindi rifornita con polvere vergine dalla "fornitura principale" e il processo si ripete finché la "fornitura principale" non è più sufficiente per rifornire la macchina. A questo punto, la polvere nel contenitore "primo utilizzo" viene mescolata con la polvere vergine contenuta nel contenitore "top-up" e passata attraverso il setaccio.

Questo ciclo di riutilizzo della polvere continua fino a quando viene raggiunto il numero massimo di riutilizzi previsto, quando non c'è abbastanza polvere per la produzione, o quando la polvere non è più idonea per il rinnovo.

Esiste anche un approccio ibrido che combina le due strategie precedentemente descritte. Questo metodo offre una migliore gestione della polvere e costi inferiori poiché la polvere usata viene rinnovata, ma invece di mescolarla con la polvere vergine, è possibile utilizzare qualsiasi altra polvere con un minor numero di riutilizzi.

Ogni strategia di riutilizzo presenta vantaggi e svantaggi specifici, ed è essenziale considerare attentamente i requisiti dell'applicazione, le prestazioni di tutti i processi nel ciclo di riutilizzo delle polveri e le capacità di gestione dell'organizzazione prima di scegliere quale strategia adottare.

Nel contesto delle applicazioni spaziali e aerospaziali, in cui la qualità è prioritaria, spesso si preferisce un approccio basato su contenitori per garantire maggiore affidabilità e tracciabilità della materia prima. [26] [27]

Capitolo 5: Conclusioni

In conclusione, le sfide che si presentano nell'ambito dell'Additive Manufacturing sono molteplici e, sorprendentemente, non tanto legate alla tecnologia in sé o alla fattibilità dei prodotti, quanto piuttosto alla necessità di ridefinire aspetti radicati nei tradizionali processi di produzione.

Attualmente, l'attenzione principale dovrebbe concentrarsi sull'educazione, mirando a formare una nuova generazione di ingegneri, sullo sviluppo tecnologico e delle opportunità, nonché sulla promozione di un ecosistema favorevole all'Additive Manufacturing all'interno di una supply chain integrata.

Nel settore aerospaziale, in particolare, emergono problematiche legate alla burocrazia delle certificazioni. La validazione dei processi e dei prodotti, i regolamenti e le norme di sicurezza richiedono una complessa documentazione che può risultare ostica. Inoltre, per garantire che le parti prodotte mediante stampa 3D possano equipararsi alle prestazioni dei componenti tradizionali, diventa necessario condurre test per valutare la chimica delle polveri e del prodotto finito, oltre a monitorare la microstruttura al termine del processo.

La varietà di materie prime, specialmente per quanto riguarda le polveri metalliche, risulta ancora insufficiente. Le opzioni rimangono limitate a causa della novità della tecnologia, consentendo ai produttori di stabilire prezzi vantaggiosi e di evitare una concorrenza intensa.

L'evoluzione delle tecniche di produzione e l'introduzione di nuovi processi mettono in luce le sfide connesse alle fasi di finitura e post-produzione. La pulizia dei componenti da residui di polveri e supporti, il conseguimento della finitura superficiale desiderata in componenti con geometrie complesse e l'ottimizzazione dei trattamenti termici per ridurre costi e tempi rappresentano questioni cruciali. La mancanza di standard operativi in queste fasi, spesso personalizzate per situazioni specifiche, aggiunge ulteriori complessità.

Inoltre, le competenze nell'ambito dell'Additive Manufacturing risultano ancora relativamente limitate a causa della novità della tecnologia e delle diverse varianti nei metodi applicabili. Pertanto, sarà essenziale promuovere una stretta collaborazione tra fornitori di materie prime, produttori di macchine, aziende, istituzioni universitarie e centri di ricerca per condividere dati, informazioni e diffondere conoscenze.

In questo contesto, General Electric si distingue come un leader nel campo dell'Additive Manufacturing, con un investimento di oltre \$1.5 miliardi a partire dal 2010 e soluzioni innovative per affrontare queste sfide. Ad esempio, la piattaforma software denominata Amp semplifica la gestione del processo di produzione additiva, riducendo i tempi di industrializzazione. Inoltre,

l'acquisizione di aziende come Concept Laser e Arcam, produttrici di macchine DMLM e EBM, e di AP&C, fornitore di polveri AM di alta qualità, mostra l'impegno di GE nel migliorare i materiali e nell'esplorare nuove tecniche di produzione additiva. La collaborazione con altre aziende e istituzioni rafforza ulteriormente la posizione di General Electric come leader nel settore, promuovendo l'innovazione e lo sviluppo delle applicazioni dell'Additive Manufacturing in svariati settori industriali.

Bibliografia

- [1] <https://www-statista-com.ezproxy.biblio.polito.it/statistics/1032553/worldwide-additive-manufacturing-patent-owners-trend/>
- [2] <https://patents.google.com/patent/US4575330>
- [3] <https://www.epma.com/epma-free-publications/product/introduction-to-additive-manufacturing-brochure>
- [4] <https://www.stampa3d-forum.it/articoli/guide/tecnologie-stampa-3d/>
- [5] <https://www.linkedin.com/pulse/quali-sono-gli-aspetti-economici-della-produzione-additiva-corsini/?originalSubdomain=it>
- [6] <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-011-3878-1>
Economics of additive manufacturing for end-usable metal parts -
Eleonora Atzeni & Alessandro Salmi
- [7] <https://www.stampa3d-forum.it/articoli/guide/tecnologie-stampa-3d/>
- [8] <https://www.ge.com>
- [9] <https://www.youtube.com/watch?v=6IrlR9L9hjo&t=642s>
- [10] <https://magazineabout.com/aviation/A-LEAP-for-Avio-Aero>
- [11] <https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing/industries/aviation-aerospace>
- [12] <https://www.airbus.com/en/defence/eurodrone>
- [13] <https://www.avioaero.com/it/the-catalyst-engine>
- [14] <https://magazineabout.com/it/aviation/catalyst-il-rivoluzionario>
- [15] <https://www.geaerospace.com/propulsion/commercial/ge9x>
- [16] <https://www.ge.com/additive/sites/default/files/2020-08/GE9X%20Additive%20parts.pdf>
- [17] <https://aerospacecue.it/ge9x-motore-piu-potente-eccellenza-madeinitaly/23633/>
- [18] <https://www.tctmagazine.com/additive-manufacturing-3d-printing-news/ge-aviation-ge9x-engine-receives-faa-certification/>
- [19] <https://aerospacecue.it/general-electric-ottiene-certificazione-faa-ge9x/22283/>
- [20] <https://www.tctmagazine.com/additive-manufacturing-3d-printing-news/ge-aviation-ge9x-engine-receives-faa-certification/>
- [21] https://www.faa.gov/aircraft/air_cert/design_approvals/engine_prop/engine_prop_regs/regs/
- [22] <https://aerospacecue.it/ge9x-motore-piu-grande-potente-costruito/17803/>
- [23] <https://simpleflying.com/general-electric-additive-manufacturing-benefits/>

- [24] <https://www.engineering.com/story/ges-massive-ge9x-engine-is-ready-to-fly-at-last>
- [25] [https://go.additive.ge.com/rs/706-JIU-273/images/GE%20Additive Powder%20Reuse WP US EN.pdf](https://go.additive.ge.com/rs/706-JIU-273/images/GE%20Additive%20Powder%20Reuse_WP_US_EN.pdf)
- [26] <https://3dprinting.com/metal/reusing-metal-powders/>
- [27] <https://www.canadianmetalworking.com/canadianmetalworking/article/metalworking/reuse-strategies-for-metal-additive-manufacturing-powder#:~:text=One%20is%20to%20use%20a,or%20the%20batch%20is%20unusable.>
- [28] <https://www.innovationpost.it/tecnologie/additive-manufacturing/il-settore-aerospaziale-e-la-palestra-delladditive-manufacturing/>
- [29] <https://www.ornl.gov/news/3d-printed-tool-building-aircraft-achieves-guinness-world-records-title>